

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-263094

(43)Date of publication of application : 19.09.2003

(51)Int.Cl.

G03H 1/08  
G06T 1/00

(21)Application number : 2002-065924

(71)Applicant : HAMAMATSU PHOTONICS KK

(22)Date of filing : 11.03.2002

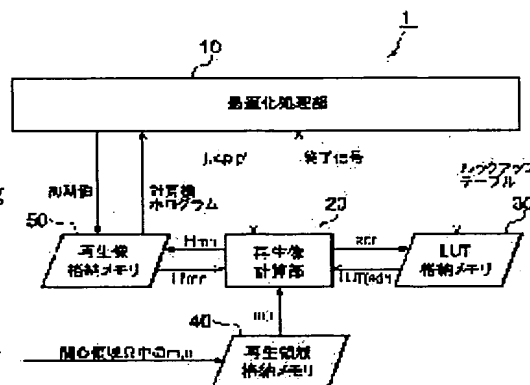
(72)Inventor : INOUE TAKU

## (54) APPARATUS AND METHOD FOR PREPARING COMPUTER HOLOGRAM

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an apparatus and a method for preparing a computer hologram by which the computer hologram can be prepared in a short time.

SOLUTION: A reproducing image calculation section 20 executes reproducing image calculation treatment based on instruction from an optimization treatment section 10. At this time, the reproducing image calculation section 20 obtains information necessary for reproducing image calculation respectively from the optimization treatment section 10, a look up table storing memory 30, a reproducing region storing memory 40 and a reproducing image storing memory 50. Based on these bits of information, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of reproducing image pixel (m,n) is calculated and complex amplitude  $H'_{mn}$  of the reproducing image pixel (m,n) after change is obtained. The look up table storing memory 30 stores a look up table LUT3 (formula 13) calculated by the optimization treatment section 10 from the beginning of optimization treatment.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

02.03.2005

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

## CLAIMS

---

### [Claim(s)]

[Claim 1] It is equipment which creates the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology. an input value  $q$  (however,  $0 \leq q < Q$ , and  $q$  and  $Q$  -- each -- an integer --) It is a function value to a thing input.  $\exp(2\pi i q/Q)$  A look-up table storage means to output the quantized output value LUT  $[q]$ . While acquiring an output value LUT  $[q]$  from said look-up table storage means based on the phase value before the change, and the input value  $q$  according to the location of said pixel according to the phase value change of which pixel contained in said computer generated hologram Based on input-value  $q'$  according to the phase value after the change, and the location of said pixel, an output value LUT  $[q']$  is acquired from said look-up table storage means. A reconstruction image count means to calculate the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram based on these output values LUT  $[q]$  and LUT  $[q']$ . Change the phase value of each pixel contained in said computer generated hologram, and it is based on the reconstruction image calculated by said reconstruction image count means according to this change, and said target reconstruction image. The computer generated hologram listing device characterized by having an optimization processing means to create said computer generated hologram for reproducing said target reconstruction image with optimization technology.

[Claim 2] When the value of the sum  $(2\pi(p+p')/P)$  of phase value  $2\pi p/P$  before change of said pixel and phase value  $2\pi p'/P$  after change is  $\pi$  or  $3\pi$ , said reconstruction image count means While obtaining the real part of an output value from said look-up table storage means based on the input value according to phase value  $2\pi p'/P$  after change Based on the input value according to the location of said pixel, an output value is acquired from said look-up table storage means. Based on these values, calculate the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram, and when the value of said sum is  $2\pi$  While obtaining the imaginary part of an output value from said look-up table storage means based on the input value according to phase value  $2\pi p'/P$  after change Based on the input value according to the location of said pixel, an output value is acquired from said look-up table storage means. Based on these values, calculate the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram, and when the values of said sum are not any of  $\pi$ , and  $2\pi$  and  $3\pi$ , either While acquiring an output value LUT  $[q]$  from said look-up table storage means based on the input value  $q$  according to the location of phase value  $2\pi p/P$  before the change, and said pixel Based on phase value  $2\pi p'/P$  after the change, and input-value  $q'$  according to the location of said pixel, an output value LUT  $[q']$  is acquired from said look-up table storage means. The computer generated hologram listing device according to claim 1 characterized by what the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram is calculated for based on these output values LUT  $[q]$  and LUT  $[q']$ .

[Claim 3] It is equipment which creates the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology. input-value  $sQ+q$  (however,  $0 \leq q < Q$ ,  $0 \leq s < P$ , and  $q$ ,  $Q$ ,  $s$  and  $P$  -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $[\exp(2\pi i s/P)-1]$  and  $\exp(2\pi i q/Q)$  A look-up table storage means to output the quantized output value LUT  $[sQ+q]$ . It responds to the phase value change of which pixel

contained in said computer generated hologram. It is based on input-value  $sQ+q$  according to the location of each phase value and said pixel before the change and after change. A reconstruction image count means to calculate the reconstruction image which acquires an output value LUT  $[sQ+q]$  from said look-up table storage means, and is reproduced by said computer generated hologram based on this output value LUT  $[sQ+q]$ . Change the phase value of each pixel contained in said computer generated hologram, and it is based on the reconstruction image calculated by said reconstruction image count means according to this change, and said target reconstruction image. The computer generated hologram listing device characterized by having an optimization processing means to create said computer generated hologram for reproducing said target reconstruction image with optimization technology.

[Claim 4] It is the approach of creating the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology. an input value  $q$  (however,  $0 \leq q < Q$ , and  $q$  and  $Q$  -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $\exp(2\pi i q/Q)$  The look-up table which outputs the quantized output value LUT  $[q]$  is prepared. While acquiring an output value LUT  $[q]$  from said look-up table based on the phase value before the change, and the input value  $q$  according to the location of said pixel according to the phase value change of which pixel contained in said computer generated hologram Based on input-value  $q'$  according to the phase value after the change, and the location of said pixel, an output value LUT  $[q']$  is acquired from said look-up table. Based on these output values LUT  $[q]$  and LUT  $[q']$ , the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram is calculated. The computer generated hologram creation approach characterized by what the phase value of each pixel contained in said computer generated hologram is changed, and said computer generated hologram for reproducing said target reconstruction image is created for with optimization technology based on the reconstruction image calculated according to this change, and said target reconstruction image.

[Claim 5] In case the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram is calculated, when the value of the sum  $(2\pi(p+p')/P)$  of phase value  $2\pi p/P$  before change of said pixel and phase value  $2\pi p'/P$  after change is  $\pi$  or  $3\pi$  While obtaining the real part of an output value from said look-up table based on the input value according to phase value  $2\pi p'/P$  after change Based on the input value according to the location of said pixel, an output value is acquired from said look-up table. Based on these values, calculate the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram, and when the value of said sum is  $2\pi$  While obtaining the imaginary part of an output value from said look-up table based on the input value according to phase value  $2\pi p'/P$  after change Based on the input value according to the location of said pixel, an output value is acquired from said look-up table. Based on these values, calculate the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram, and when the values of said sum are not any of  $\pi$ , and  $2\pi$  and  $3\pi$ , either While acquiring an output value LUT  $[q]$  from said look-up table based on the input value  $q$  according to the location of phase value  $2\pi p/P$  before the change, and said pixel Based on phase value  $2\pi p'/P$  after the change, and input-value  $q'$  according to the location of said pixel, an output value LUT  $[q']$  is acquired from said look-up table. The computer generated hologram creation approach according to claim 4 characterized by what the reconstruction image reproduced by said computer generated hologram is calculated for based on these output values LUT  $[q]$  and LUT  $[q']$ .

[Claim 6] It is the approach of creating the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology. input-value  $sQ+q$  (however,  $0 \leq q < Q$ ,  $0 \leq s < P$ , and  $q$ ,  $Q$ ,  $s$  and  $P$  -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $[\exp(2\pi i s/P)-1]$  and  $\exp(2\pi i q/Q)$  The look-up table which outputs the quantized output value LUT  $[sQ+q]$  is prepared. It responds to the phase value change of which pixel contained in said computer generated hologram. It is based on input-value  $sQ+q$  according to the location of each phase value and said pixel before the change and after change. Based on this output value LUT  $[sQ+q]$ , the reconstruction image which acquires an output value LUT  $[sQ+q]$  from said look-up table, and is reproduced by said computer generated hologram \*\*\*\*\*, The computer generated hologram creation approach characterized by what the phase value of each pixel contained in said computer generated hologram is changed, and said computer

generated hologram for reproducing said target reconstruction image is created for with optimization technology based on the reconstruction image calculated according to this change, and said target reconstruction image.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

## DETAILED DESCRIPTION

---

### [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the equipment and the approach of creating the computer generated hologram (a phase hologram or complex amplitude hologram) for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology.

[0002]

[Description of the Prior Art] In fields, such as laser marking, laser beam machining, the Mitsuzo form, and a photo pincette, the image pattern formation technique which forms a laser beam in a desired configuration is searched for. There is a technique of using a computer generated hologram for one of the image pattern formation techniques. With this technique, in quest of the computer generated hologram which may generate the reconstruction image (target reconstruction image) of the configuration of a target request, it creates by count, and the illumination light is irradiated and a target reconstruction image is formed in this computer generated hologram. Since a holography technique is used for the technique using this computer generated hologram, its degree of freedom is high. Moreover, if a phase hologram is used as a computer generated hologram, since the loss of light is small, the use effectiveness of light energy is high.

[0003] Creation of this computer generated hologram cannot be performed analytically, but it is carried out by the optimization technology based on repeated calculation. It starts from a certain initial computer generated hologram, and creation of the computer generated hologram by optimization performs repeated calculation, and it updates the computer generated hologram serially so that the reconstruction image reproduced from the computer generated hologram called for by this count may approach a target reconstruction image. A good result will be obtained if such optimization technology is used.

[0004] For example "Reference A.G.Kirk and T. J.Hall and "Design of binary computer generated holograms by simulated annealing: By coding density and reconstruction error, "Opt.Comm.Vol.94, and the computer generated hologram creation approach indicated by pp.491-496 (1992)" as optimization technology -- SHIMYURETEDDO annealing (SA: Simulated Annealing) -- law is used. Kirk and others has applied the SA method to creation of the binary phase mold computer generated hologram by which the hologram value was restricted to binary. In addition, although there is various reference which applied the SA method to creation of a computer generated hologram, Kirk's and others above-mentioned reference has made reference clearly about the device for shortening creation time also in it.

[0005] First, the general procedure of the computer generated hologram creation approach using the SA method constituted based on this reference is explained. In the procedure (S1) While determining the initial value of a computer generated hologram Determine the initial value of the parameter used by the SA method, and one piece or two or more pixels are chosen among the pixels of a large number contained in a computer generated hologram (S2). (S3) The pixel value of the selected pixel is changed and it is (S4). The reconstruction image reproduced by the computer generated hologram after changing a pixel value is calculated. (S5) The error of the reconstruction image and target reconstruction image which were calculated is calculated (S6), the error is evaluated. It determines whether accept the pixel value change (the above-

mentioned step S3) of the selected pixel (S7), it judges whether the above-mentioned steps S2-S6 were processed about all the pixels contained in a computer generated hologram. The parameter which will be used for the above-mentioned step S2 by return (S8) and the SA method if it is "no" is updated, and it is (S9). It judges whether count may be ended or not, and if it is "no", it will return to the above-mentioned step S2.

[0006] The computation procedure by this SA method has the loop formation of a duplex. By the loop formation (steps S2-S7) of the inside of them, while the parameter used by the SA method has been fixed, the pixel contained in a computer generated hologram is scanned, and the pixel value concerned is optimized. By the outside loop formation (step S2 - S9), optimization is repeated updating the parameter used by the SA method, and the degree of optimization is raised.

[0007]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, since both the computer generated hologram creation approaches by the SA method indicated by the above-mentioned reference have a count of a repeat, and large computational complexity, they have the trouble of requiring very long time amount.

[0008] Speaking of the count of a repeat, since the loop formation inside the SA method is performed about all the pixels contained in a computer generated hologram, the count of a repeat of it is the same as that of the number of pixels. Considering that the number of pixels generally creates the computer generated hologram for VGA specification liquid crystal display monitors very greatly, the count of a repeat of an inside loop formation becomes 300,000 times or more. Furthermore, in order to acquire a solution with sufficient extent, it is necessary to repeat the loop formation of the outside of step S2 - S9 many times. Thus, since the count of a repeat of the loop formation of the both sides of an outside and the inside is large, creation time becomes long.

[0009] If the number of pixels increases, creation time will become long further. At recent years, the number of pixels of the device which can be used for a hologram display is increasing in the rapid pitch by development of a process technique. An increment of the number of pixels of a hologram also increases the number of occurrence for the pixel scan in an inside loop formation. Moreover, the reconstruction image computational complexity in the above-mentioned step S4 also increases. Furthermore, since a degree of freedom becomes high, the number of occurrence for the optimization in an outside loop formation increases. Thus, when the number of pixels of a computer generated hologram increases, hologram creation time will increase rapidly.

[0010] Even if a hologram value is set to many level, computation time increases. Although the binary hologram was created by Kirk's and others above-mentioned reference using the SA method, since there is little computational complexity of step 4, in the case of a binary hologram, there is comparatively little whole computational complexity from the first. Moreover, since the degree of freedom is low, there are also comparatively few counts of a repeat and they end. On the other hand, when a hologram value is a multiple value, in case the computational complexity of step S4 is binary, it doubles [ more than ]. Furthermore, since a degree of freedom becomes high, the count of a repeat of an outer loop increases. From these two effectiveness, when the number of level of a hologram value increases, hologram creation time will increase rapidly.

[0011] By Kirk's and others above-mentioned reference, improvement in the speed of reconstruction image count is timed by two devices, use [ eliminating unnecessary count and ] a look-up table, in count of the reconstruction image in step S4. The former is applicable also to a multiple-value hologram. However, though regrettable, since it is devised for the binary hologram about their look-up table, creation time is sharply irreducible even if it applies to the hologram of a multiple value.

[0012] Thus, when it is the technique of time amount starting count from the first, a creation duration increases the SA method rapidly with increase of the number of pixels, or increase of the number of level of a hologram value. The creation duration has served as a serious failure in the case of utilization for a long time. Moreover, even if it uses the look-up table described in Kirk's and others reference in the case of a multiple-value hologram, sufficient improvement in the speed is not expectable.

[0013] This invention is made in order to cancel the above-mentioned trouble, and it aims at offering the computer generated hologram listing device and approach of creating a computer

generated hologram in a short time.

[0014]

[Means for Solving the Problem] The computer generated hologram listing device concerning this invention is equipment which creates the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology. (1) -- the input value  $q$  (however,  $0 \leq q < Q$ , and  $q$  and  $Q$  -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $\exp(2\pi i q/Q)$  A look-up table storage means to output the quantized output value LUT  $[q]$ , (2) While acquiring an output value LUT  $[q]$  from a look-up table storage means based on the phase value before the change, and the input value  $q$  according to the location of a pixel according to the phase value change of which pixel contained in a computer generated hologram Based on input-value  $q'$  according to the phase value after the change, and the location of a pixel, an output value LUT  $[q']$  is acquired from a look-up table storage means. A reconstruction image count means to calculate the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram based on these output values LUT  $[q]$  and LUT  $[q']$ , (3) Change the phase value of each pixel contained in a computer generated hologram, and it is based on the reconstruction image and target reconstruction image which are calculated by the reconstruction image count means according to this change. It is characterized by having an optimization processing means to create the computer generated hologram for reproducing a target reconstruction image with optimization technology.

[0015] Moreover, the computer generated hologram creation approach concerning this invention the approach of creating the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology -- it is -- the (1) input value  $q$  (however,  $0 \leq q < Q$ , and  $q$  and  $Q$  -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $\exp(2\pi i q/Q)$  The look-up table which outputs the quantized output value LUT  $[q]$  is prepared. (2) While acquiring an output value LUT  $[q]$  from a look-up table based on the phase value before the change, and the input value  $q$  according to the location of a pixel according to the phase value change of which pixel contained in a computer generated hologram Based on input-value  $q'$  according to the phase value after the change, and the location of a pixel, an output value LUT  $[q']$  is acquired from a look-up table. Based on these output values LUT  $[q]$  and LUT  $[q']$ , the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated. (3) The phase value of each pixel contained in a computer generated hologram is changed, and it is characterized by what the computer generated hologram for reproducing a target reconstruction image is created for with optimization technology based on the reconstruction image and target reconstruction image which are calculated according to this change.

[0016] The computer generated hologram listing device concerning above-mentioned this invention and the computer generated hologram creation approach concerning this invention are mutually based on the same technical thought. In this invention, by preparing a look-up table which was mentioned above, the amount of operations at the time of calculating a reconstruction image is reduced, and a computer generated hologram is created for a short time.

[0017] For the computer generated hologram listing device concerning this invention, a reconstruction image count means is (1). When the value of the sum  $(2\pi(p+p')/P)$  of phase value  $2\pi p/P$  before change of a pixel and phase value  $2\pi p'/P$  after change is  $\pi$  or  $3\pi$  While obtaining the real part of an output value from a look-up table storage means based on the input value according to phase value  $2\pi p'/P$  after change Based on the input value according to the location of a pixel, an output value is acquired from a look-up table storage means. Based on these values, the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated, and it is (2). When a phase value is  $2\pi$  While obtaining the imaginary part of an output value from a look-up table storage means based on the input value according to phase value  $2\pi p'/P$  after change Based on the input value according to the location of a pixel, an output value is acquired from a look-up table storage means. Based on these values, the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated, and it is (3). When phase values are not any of  $\pi$ , and  $2\pi$  and  $3\pi$ , either While acquiring an output value LUT  $[q]$  from a look-up table storage means based on the input value  $q$  according to the location of phase value

2pip/P before the change, and a pixel Based on phase value 2pip'/P after the change, and input-value q' according to the location of a pixel, an output value LUT [q'] is acquired from a look-up table storage means. It is characterized by what the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated for based on these output values LUT [q] and LUT [q'].

[0018] Moreover, the computer generated hologram creation approach concerning this invention It is (1) in case the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated. When the value of the sum (2pi(p+p')/P) of phase value 2pip/P before change of a pixel and phase value 2pip'/P after change is pi or 3pi While obtaining the real part of an output value from a look-up table based on the input value according to phase value 2pip'/P after change Based on the input value according to the location of a pixel, an output value is acquired from a look-up table. Based on these values, the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated, and it is (2). When a phase value is 2pi While obtaining the imaginary part of an output value from a look-up table based on the input value according to phase value 2pip'/P after change Based on the input value according to the location of a pixel, an output value is acquired from a look-up table, the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated based on these values, and it is (3). When phase values are not any of pi, and 2pi and 3pi, either While acquiring an output value LUT [q] from a look-up table based on the input value q according to the location of phase value 2pip/P before the change, and a pixel Based on phase value 2pip'/P after the change, and input-value q' according to the location of a pixel, an output value LUT [q'] is acquired from a look-up table. It is characterized by what the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is calculated for based on these output values LUT [q] and LUT [q'].

[0019] Thus, the amount of operations at the time of the value of the sum (2pi(p+p')/P) of phase value 2pip/P before change of a pixel and phase value 2pip'/P after change calculating a reconstruction image in the case of which [ of pi and 2pi and 3pi ] is reduced further, and a computer generated hologram is created further for a short time.

[0020] The alien-machine hologram listing device concerning this invention the equipment which creates the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology -- it is -- (1) input-value sQ+q (however,  $0 \leq q < Q$ ,  $0 \leq s < P$ , and q, Q, s and P -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $[\exp(2\pi i s/P) - 1]$  and  $\exp(2\pi i q/Q)$  A look-up table storage means to output the quantized output value LUT [sQ+q], (2) It responds to the phase value change of which pixel contained in a computer generated hologram. It is based on input-value sQ+q according to the location of each phase value and a pixel before the change and after change. A reconstruction image count means to calculate the reconstruction image which acquires an output value LUT [sQ+q] from a look-up table storage means, and is reproduced by the computer generated hologram based on this output value LUT [sQ+q], (3) Change the phase value of each pixel contained in a computer generated hologram, and it is based on the reconstruction image and target reconstruction image which are calculated by the reconstruction image count means according to this change. It is characterized by having an optimization processing means to create the computer generated hologram for reproducing a target reconstruction image with optimization technology.

[0021] Moreover, the alien-machine hologram creation approach concerning this invention the approach of creating the computer generated hologram for producing the playback light with which the phase was modulated at least by the incidence of the illumination light, and reproducing a target reconstruction image with optimization technology -- it is -- (1) input-value sQ+q (however,  $0 \leq q < Q$ ,  $0 \leq s < P$ , and q, Q, s and P -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $[\exp(2\pi i s/P) - 1]$  and  $\exp(2\pi i q/Q)$  The look-up table which outputs the quantized output value LUT [sQ+q] is prepared. (2) It responds to the phase value change of which pixel contained in a computer generated hologram. It is based on input-value sQ+q according to the location of each phase value and a pixel before the change and after change. Based on this output value LUT [sQ+q], the reconstruction image which acquires an output value LUT [sQ+q] from a look-up table, and is reproduced by the computer generated hologram \*\*\*\*\* (3) The phase value of each pixel contained in a computer generated hologram is changed, and it is characterized by what the computer generated hologram for reproducing a



target reconstruction image is created for with optimization technology based on the reconstruction image and target reconstruction image which are calculated according to this change.

[0022] The computer generated hologram listing device concerning above-mentioned this invention and the computer generated hologram creation approach concerning this invention are mutually based on the same technical thought. In this invention, by preparing a look-up table which was mentioned above, the amount of operations at the time of calculating a reconstruction image is reduced further, and a computer generated hologram is created further for a short time.

[0023]

[Embodiment of the Invention] Hereafter, the gestalt of operation of this invention is explained to a detail with reference to an accompanying drawing. In addition, in explanation of a drawing, the same sign is given to the same element, and the overlapping explanation is omitted.

[0024] First, the reconstruction image computation (processing of the above-mentioned step S4) in the computer generated hologram listing device and approach concerning this operation gestalt is explained. When a computer generated hologram is the Fourier transform hologram, the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram is acquired by carrying out the Fourier transform of the computer generated hologram. A fast Fourier transform (FFT: Fast Fourier Transform) and discrete Fourier transform (DFT: Discrete Fourier Transform) are used for count by this Fourier transform. If the number of data is set to  $V$ , since the computational complexity at the time of calculating a reconstruction image by DFT is generally proportional to  $V^2$  to the computational complexity at the time of calculating a reconstruction image by FFT being proportional to  $V \cdot \log V$ , the FFT is more nearly high-speed.

[0025] As [ mentioned / above / in optimization technology, such as the SA method, / however, ] (S2) One piece or two or more pixels are chosen among the pixels of a large number contained in a computer generated hologram (S3), The pixel value of the selected pixel is changed and it is (S4). What is necessary is to calculate only about the pixel from which the pixel value changed, since the reconstruction image reproduced by the computer generated hologram after changing a pixel value is calculated with the Fourier transform. Therefore, in this case, since the computational complexity at the time of calculating a reconstruction image by DFT is proportional to  $V$ , its DFT is more nearly high-speed. Moreover, a reconstruction image is calculable in a short time by using a look-up table in the case of count by DFT.

[0026] Furthermore, in FFT, since all the pixels contained in the reconstruction image on a playback side are calculated by coincidence, even if it is the case which needs a part of reconstruction image, all the pixels contained in a reconstruction image must be calculated. What is necessary is on the other hand, to calculate only about the required pixel in DFT, when a part of reconstruction image is required since each pixel contained in a reconstruction image is calculated independently. Namely, what is necessary is to calculate only about the pixel contained in the area of interest of the reconstruction images on the occasion of count of the reconstruction image by DFT. If the total number of pixels of a reconstruction image is set to  $V$  and the number of pixels in an area of interest is set to  $U$ , the computational complexity of the area of interest by DFT is proportional to  $U$ , and the computational complexity in an inside loop formation (steps S2-S7) is proportional to  $V \cdot U$ . In addition, although the area of interest of the reconstruction images changes with application, generally it is a field whose pixel value is not 0.

[0027] Based on the idea explained above, the computer generated hologram creation approach concerning this operation gestalt calculates a reconstruction image by DFT using a look-up table, and creates the computer generated hologram for reproducing a target reconstruction image with optimization technology based on this reconstruction image and target reconstruction image that were calculated. in addition, a genetic algorithm (GA: Genetic Algorithm) besides the SA method mentioned already as optimization technology -- law and a Fourier transform iterative method are used. Below, the look-up table referred to in the case of count of the reconstruction image by DFT is mainly explained.

[0028] The number of pixels of the computer generated hologram which should be created is made into  $M \times N$ . The complex amplitude of the pixel (below, "a pixel ( $j, k$ )" is written.) located in the  $j$ -th line  $k$ -th train in a computer generated hologram ( $1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq N$ ) is written like  $h_{jk}$ . [ this pixel ] Moreover, the complex amplitude of the light of a pixel (below, "a pixel ( $m, n$ )" is

written.) located in the  $m$ -th line  $n$ -th train in the reconstruction image on a playback side ( $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ ) is written like  $H_{mn}$ . [ this pixel ] When the complex amplitude of the pixel ( $j, k$ ) of a computer generated hologram changes from  $h_{jk}$  to  $h'_{jk}$ , complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the light of the pixel on a reconstruction image ( $m, n$ ) is [0029].

[Equation 1]

$$\Delta H_{mn} = \Delta h_{jk} \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{jm}{M} + \frac{kn}{N} \right) \right] \quad \dots (1)$$

It is expressed with the becoming formula. Here,  $i$  expresses an imaginary unit. Moreover,  $\Delta h_{jk}$  expresses the complex amplitude variation of the pixel ( $j, k$ ) of a computer generated hologram, and is [0030].

[Equation 2]

$$\Delta h_{jk} = h'_{jk} - h_{jk} \quad \dots (2)$$

It is expressed with the becoming formula.

[0031] As shown in the above-mentioned (1) formula, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the light of each pixel on a reconstruction image ( $m, n$ ) is dependent only on complex amplitude variation  $\Delta h_{jk}$  of the pixel ( $j, k$ ) of a computer generated hologram. Complex amplitude  $H'_{mn}$  of the light of the pixel on the reconstruction image after such change ( $m, n$ ) is [0032] to the complex amplitude  $H_{mn}$  before change.

[Equation 3]

$$H'_{mn} = H_{mn} + \Delta H_{mn} \quad \dots (3)$$

It is expressed with the becoming formula. Therefore, after that, the complex amplitude  $H_{mn}$  of the light of each pixel on a reconstruction image ( $m, n$ ) should just add variation  $\Delta H_{mn}$ , if it calculates only once first.

[0033] In optimization technology, such as the SA method, the error  $C$  of the reconstruction image and target reconstruction image which were calculated as mentioned above is calculated, and it determines whether accept the pixel value change of the pixel which evaluated and chose the error  $C$ . On the occasion of count of this error  $C$ , it only sets in the area of interest  $\omega$  of the reconstruction images, and is [0034].

[Equation 4]

$$C = \sum_{m,n \in \omega} \{ |F_{mn}|^2 - |H_{mn}|^2 \} \quad \dots (4)$$

What is necessary is just to ask for the becoming sum of squares. Here,  $F_{mn}$  is the complex amplitude of the light of the pixel on a target reconstruction image ( $m, n$ ). In addition, if energy (sum of squares of the complex amplitude of the light of all pixels) of a target reconstruction image is made equal to input luminous energy (sum of squares of the absolute value of  $h_{jk}$ ), even if it restricts the count range in an area of interest  $\omega$  like the above-mentioned (4) formula, the result of optimization will hardly be affected.

[0035] Real part is calculated using a cos function and, as for the exp function of the right-hand side of the above-mentioned (1) formula, imaginary part is calculated using a sin function. It can ask for the exp value of a function of the right-hand side of the above-mentioned (1) formula in a short time by changing to count of these cos(es) function and each sin function, and referring to the look-up table prepared beforehand. When the least common multiple  $L$  of integers  $M$  and  $N$  ( $L = dM = eN$ ,  $d$  and  $e$  each integer.) is used, the look-up table LUT 1 used here is [0036].

[Equation 5]

$$LUT1[djm + ekn] = \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{djm + ekn}{L} \right) \right] \quad \dots (5)$$

It is expressed with the becoming formula. In addition, by Kirk's and others reference, the exponential-function section of (1) type right-hand side is look-up-table-ized. Since about them a hologram is binary and  $\Delta h_{jk}$  had only two values, 2 and -2, the effectiveness of improvement in the speed fully showed up now. However, in the case of a multiple value, big effectiveness is not expectable unless it look-up-table-izes also including the part of  $\Delta h_{jk}$  like this operation gestalt.

[0037] In a computer generated hologram, either [ either / both sides or ] reinforcement and a phase are sampled, and the complex amplitude  $h_{jk}$  of each pixel (j, k) is quantized. Therefore, not only the exponential-function section of the above-mentioned (1) formula but complex amplitude variation  $\Delta h_{jk}$  can be calculated by referring to the look-up table prepared beforehand.

[0038] When the computer generated hologram which it is going to create is a hologram on the strength, each complex amplitude  $h_{jk}$  and  $h'_{jk}$  of each pixel (j, k) of a computer generated hologram are the quantized real number. Therefore, the look-up table of complex amplitude variation  $\Delta h_{jk}$  can be created easily in this case. Moreover, since count of the right-hand side of the above-mentioned (1) formula serves as a product of the real number and complex, reference of the memory which memorized the look-up table is 3 times, the multiplication of the real number is 2 times and there is little operand.

[0039] When the computer generated hologram which it is going to create is a phase hologram, amplitude reinforcement is a fixed real number value, the phase is quantized and each complex amplitude  $h_{jk}$  and  $h'_{jk}$  of each pixel (j, k) of a computer generated hologram are complex. When a computer generated hologram is a complex amplitude hologram, the both sides of amplitude reinforcement and a phase are quantized, and each complex amplitude  $h_{jk}$  and  $h'_{jk}$  of each pixel (j, k) of a computer generated hologram are complex.

[0040] When a computer generated hologram is a phase hologram or a complex amplitude hologram, the phase of the complex amplitude  $h_{jk}$  of each pixel (j, k) of a computer generated hologram shall be quantized on P level in the range of 0-2pi. When the phase level of the complex amplitude  $h_{jk}$  of each pixel (j, k) of a computer hologram is p (however,  $0 \leq p < P$ , p and P each integer.) (i.e., when a phase value is  $2\pi p/P$ ), the complex amplitude  $h_{jk}$  is [0041].

[Equation 6]

$$h_{jk} = A_{jk} \exp\left(2\pi i \frac{p}{P}\right) \quad \dots (6)$$

It is expressed with the becoming formula. Here,  $A_{jk}$  is a real number value and expresses the amplitude reinforcement of the playback light from the pixel (j, k) of a computer generated hologram.

[0042] Supposing the phase level of the complex amplitude of the pixel (j, k) of a computer hologram changes from p to p' in process of optimization technology, complex amplitude variation  $\Delta h_{jk}$  of the pixel (j, k) of the computer hologram of the above-mentioned (2) formula is

[0043].

[Equation 7]

$$\Delta h_{jk} = A_{jk} \left\{ \exp\left(2\pi i \frac{p'}{P}\right) - \exp\left(2\pi i \frac{p}{P}\right) \right\} \quad \dots (7)$$

It is expressed with the becoming formula. Look-up-table-izing is possible for the inside of the parenthesis of the right-hand side of this (7) type. The look-up table LUT 2 in this case is [0044].

[Equation 8]

$$LUT2[p', p] = \exp\left(2\pi i \frac{p'}{P}\right) - \exp\left(2\pi i \frac{p}{P}\right) \quad \dots (8)$$

It is expressed with the becoming formula. And look-up tables LUT1 and LUT2 are used for complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of the reconstruction image of the above-mentioned (1) formula, and it is [0045].

[Equation 9]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} LUT2[p', p] LUT1[djm + ekn] \quad \dots (9)$$

It is expressed with the becoming formula.

[0046] look-up tables LUT1 and LUT2 -- since each output value is complex, the multiplication of complex and complex will be performed in the right-hand side of this (9) type. Moreover, in order to calculate the right-hand side of the above-mentioned (9) formula, reference of reference of the look-up table of  $A_{jk}$ , the real part of the above-mentioned look-up table LUT 1, and each imaginary part, the real part of the above-mentioned look-up table LUT 2, and each imaginary part need to be referred to. Therefore, in count of the right-hand side of the above-

mentioned (9) formula, reference of the memory which memorized the look-up table is 5 times, the multiplication of the real number is 4 times, and addition and subtraction of the real number are 4 times. Thus, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image can be calculated in a short time by calculating according to the above-mentioned (9) formula.

[0047] However, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image can be further calculated in a short time with devising a look-up table as follows. That is, it is [0048] when the above-mentioned (7) formula is substituted for the above-mentioned (1) formula.

[Equation 10]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} \left\{ \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{p'}{P} + \frac{jm}{M} + \frac{kn}{N} \right) \right] - \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{p}{P} + \frac{jm}{M} + \frac{kn}{N} \right) \right] \right\} \quad \dots (10)$$

The becoming formula is obtained. And it is [0049], using the least common multiple of P, M, and N as Q.

[Equation 11]

$$Q = aP = bM = cN \quad \dots (11)$$

It carries out. here -- a, b, and c -- each is an integer. When this Q is used, the above-mentioned (10) formula is [0050].

[Equation 12]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} \left\{ \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{ap' + bjm + ckn}{Q} \right) \right] - \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{ap + bjm + ckn}{Q} \right) \right] \right\} \quad \dots (12)$$

It is expressed.

[0051] It quantizes on Q level in the range of 0-2pi, and that phase can transpose each of two exp functions in the right-hand side of this (12) type to one look-up table. The look-up table LUT 3 used here is [0052].

[Equation 13]

$$LUT3[q] = \exp \left( 2\pi i \frac{q}{Q} \right) \quad \dots (13)$$

It is expressed with the becoming formula, however,  $0 \leq q < Q$  -- \*\*, and q and Q -- each is an integer. If this look-up table LUT 3 is used, the above-mentioned (12) formula will be [0053].

[Equation 14]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} \{ LUT3[ap' + bjm + ckn] - LUT3[ap + bjm + ckn] \} \quad \dots (14)$$

It is expressed.

[0054] In order to calculate the right-hand side of the above-mentioned (14) formula, reference of the look-up table of  $A_{jk}$ , the real part of the above-mentioned look-up table LUT 3, and each imaginary part need to be referred to. Therefore, in count of the right-hand side of the above-mentioned (14) formula, reference of the memory which memorized the look-up table is 5 times, the multiplication of the real number is 2 times, and addition and subtraction of the real number are 2 times. Thus, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image can be further calculated in a short time rather than the case where the above-mentioned (9) formula is followed, by calculating according to the above-mentioned (14) formula.

[0055] moreover, the phase level p of the complex amplitude  $h_{jk}$  of the pixel (j, k) of a computer hologram and p' -- or [ that this complex amplitude  $h_{jk}$  is any of the real number, an imaginary, and others since the complex amplitude  $h_{jk}$  of the pixel (j, k) of a computer hologram becomes the real number or an imaginary depending on the combination of each value ] -- a case -- dividing -- carrying out -- calculating -- things -- a reconstruction image -- it can ask for complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of a pixel (m, n) in a short time further.

[0056] namely, the phase level p of the complex amplitude  $h_{jk}$  of the pixel (j, k) of a computer hologram and p' -- since each value is the integer of under or more 0P -- [0057]

[Equation 15]

$$p' + p = \frac{P}{2} \quad \dots (15)$$

And [0058]

[Equation 16]

$$p' + p = \frac{3}{2}P \quad \dots (16)$$

When the relational expression of \*\*\*\*\* is filled, complex amplitude variation  $\Delta h_{jk}$  of the pixel (j, k) of a computer generated hologram is the real number, and it is [0059].

[Equation 17]

$$\Delta h_{jk} = 2 \cos \left( 2\pi \frac{p'}{P} \right) \quad \dots (17)$$

It is expressed with the becoming formula. At this time, the above-mentioned (12) formula is [0060].

[Equation 18]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} \operatorname{Re} \{ \operatorname{LUT3}[ap'] \} \operatorname{LUT3}[bjm + ckn] \quad \dots (18)$$

It is expressed. In addition, in this (18) type,  $\operatorname{Re} [-]$  expresses actuation of referring to only real part.

[0061] On the other hand, it is [0062].

[Equation 19]

$$p' + p = P \quad \dots (19)$$

When the becoming relational expression is filled, complex amplitude variation  $\Delta h_{jk}$  of the pixel (j, k) of a computer generated hologram is an imaginary, and it is [0063].

[Equation 20]

$$\Delta h_{jk} = 2i \sin \left( 2\pi \frac{p'}{P} \right) \quad \dots (20)$$

It is expressed with the becoming formula. At this time, the above-mentioned (12) formula is [0064].

[Equation 21]

$$\Delta H_{mn} = iA_{jk} \operatorname{Im} \{ \operatorname{LUT3}[ap'] \} \operatorname{LUT3}[bjm + ckn] \quad \dots (21)$$

It is expressed. In addition, in this (21) type,  $\operatorname{Im} [-]$  expresses actuation of referring to only imaginary part.

[0065] In order to calculate the right-hand side of the above-mentioned (18) formula, the real part of the above-mentioned look-up table LUT 3 needs reference of the look-up table of  $A_{jk}$ , and to be referred to. Moreover, in order to calculate the right-hand side of the above-mentioned (21) formula, the imaginary part of the above-mentioned look-up table LUT 3 needs reference of the look-up table of  $A_{jk}$ , and to be referred to. Therefore, reference of the memory which memorized the look-up table in count of the right-hand side of the above-mentioned (19) formula or the above-mentioned (21) formula is 4 times, the multiplication of the real number is 3 times and addition and subtraction of the real number are unnecessary. Thus, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image can be further calculated in a short time by calculating according to the above-mentioned (18) formula, when the above-mentioned (15) formula or the above-mentioned (16) formula is materialized, and calculating according to the above-mentioned (21) formula, when the above-mentioned (19) formula is materialized. In addition, when neither the above-mentioned (15) formula nor the above-mentioned (16) formula nor the above-mentioned (19) formula is materialized, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image is calculated according to the above-mentioned (14) formula.

[0066] Furthermore, in optimization technology (especially the SA method), complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image can be further calculated in a short time with the value of phase level variation  $\Delta p (=p' - p)$  of the pixel (j, k) of a computer hologram being limited, and devising a look-up table as follows in this case. That is, the above-mentioned (12) formula is [0067] in this case.

[Equation 22]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} \left[ \exp \left( \frac{2\pi i \Delta p}{P} \right) - 1 \right] \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{ap + bjm + ckn}{Q} \right) \right] \quad \dots (22)$$

It is expressed with the becoming formula. here -- the phase level p and p' -- since each is the integers from 0 to P-1, phase level variation  $\Delta p$  is the integers from -P+1 to P-1. however -- from the property of a complex exponential function  $\exp[-ix] = \exp[i(2\pi - x)]$  it is -- since -- inside of the above-mentioned (22) types  $[\exp(2\pi i \Delta p/P) - 1]$  \*\*\*\*\* -- what is necessary is just to prepare a look-up table in the range from 0 to P-1 about phase level variation  $\Delta p$  [0068] Therefore, it expresses  $q = p + bjm + ckn$  ( $0 \leq q < Q$ ) and is [0069].

[Equation 23]

$$LUT4'[s, q] = LUT4[sQ + q] = \left[ \exp \left( \frac{2\pi i s}{P} \right) - 1 \right] \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{q}{Q} \right) \right] \quad \dots (23)$$

By preparing the look-up table LUT 4 expressed with the becoming formula, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image is [0070].

[Equation 24]

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} LUT4[sQ + q] \quad \dots (24)$$

It is expressed with the becoming formula. However, s is calculated by P- $\Delta p$ , when it is  $\Delta p$  when  $\Delta p$  is forward, and  $\Delta p$  is negative, and in any case, it is the integers from 0 to P-1. Moreover, LUT4' [-, -] means two-dimensional array, and LUT4 [-] expresses this with one-dimensional array.

[0071] In order to calculate the right-hand side of the above-mentioned (24) formula, reference of the look-up table of  $A_{jk}$ , the real part of the above-mentioned look-up table LUT 4, and each imaginary part need to be referred to. Therefore, reference of the memory which memorized the look-up table in count of the right-hand side of the above-mentioned (24) formula is 3 times, the multiplication of the real number is 2 times and addition and subtraction of the real number are unnecessary. Thus, when the value of phase level variation  $\Delta p$  of the pixel (j, k) of a computer hologram is limited, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image can be further calculated in a short time by calculating according to the above-mentioned (24) formula.

[0072] In addition, each look-up table is a value by which real part is calculated using a cos function including real part and imaginary part, and is a value by which imaginary part is calculated using a sin function. If this is used, size of each look-up table can be made small. For example,  $\cos(x) = \sin(x - \pi)$  If relation is used, each look-up table can unify real part and imaginary part, and size will be set to one half. moreover,  $\cos(x) = -\cos(x - \pi)$  and --  $\cos(x) = \cos(-x)$  -- as for each look-up table, size will be set to one fourth if relation is used. As for each look-up table, size will be set to one eighth if these approaches are adopted as coincidence. However, this approach is inapplicable to a look-up table LUT 4.

[0073] Moreover, by the SA method, in 1 time of the look up operation in an inside loop formation (steps S2-S7), although it is usual that the number of the pixels to which a pixel value is changed in a computer generated hologram is one, the pixel value of two or more pixels may be changed to coincidence. Moreover, by the GA method, the pixel value of two or more pixels is changed to coincidence in 1 time of look up operation. Thus, in changing the pixel value of two or more pixels to coincidence in 1 time of look up operation, it requires consideration. That is, the computation time of the reconstruction image by this operation gestalt is proportional to the value of x (the number of pixels of the area of interest  $\omega$  in a reconstruction image) (the number of pixels from which a pixel value changes in a computer generated hologram). When there are many pixels from which a pixel value changes in a computer generated hologram, compared with the computation time by FFT, the computation time of the reconstruction image by DFT of this operation gestalt can become long. On the other hand, the computation time by FFT and each computation time by DFT of this operation gestalt can be measured beforehand. Therefore, what is necessary is to calculate a reconstruction image using FFT, and just to calculate a reconstruction image using DFT of this operation gestalt, when that is not right when it is expected that the computation time by DFT of this operation gestalt becomes long

compared with the computation time by FFT.

[0074] Above, it explained centering on the theoretical side of the reconstruction image computation in the computer generated hologram listing device and approach concerning this operation gestalt. Next, while explaining the configuration and actuation of a computer generated hologram listing device concerning this operation gestalt, the computer generated hologram creation approach concerning this operation gestalt is explained. Drawing 1 is the block diagram of the computer generated hologram listing device 1 concerning this operation gestalt.

[0075] The computer hologram listing device 1 concerning this operation gestalt calculates a reconstruction image by DFT with reference to the look-up tables LUT3 or LUT4 mentioned above, evaluates the error of this reconstruction image and target reconstruction image that were calculated, optimizes a computer hologram based on this error, and creates the computer hologram which can reproduce a target reconstruction image. The computer generated hologram listing device 1 is equipped with the optimization processing section 10, the reconstruction image count section 20, the look-up table storing memory 30, the playback field storing memory 40, and the reconstruction image storing memory 50.

[0076] The optimization processing section 10 directs to perform reconstruction image count (processing of the above-mentioned step S4) to the reconstruction image count section 20 while performing processing of the above-mentioned steps S1-S3, and S5 - S9. The optimization processing section 10 stores a look-up table required for the reconstruction image count by the reconstruction image count section 20 in the look-up table storing memory 30. The positional information  $m$  and  $n$  which shows each pixel ( $m, n$ ) contained in the area of interest  $\omega$  of the reconstruction images which should be calculated in the case of the reconstruction image count by the reconstruction image count section 20 is searched for based on a target reconstruction image, and the optimization processing section 10 stores it in the playback field storing memory 40. The optimization processing section 10 determines the initial value of a computer generated hologram, and stores it in the reconstruction image storing memory 50. Moreover, the optimization processing section 10 receives the updated computer generated hologram in which the terminate signal which shows the purport which processing of reconstruction image count ended is stored by reception and the reconstruction image storing memory 50 from the reconstruction image count section 20, and performs optimization processing.

[0077] The reconstruction image count section 20 performs processing of the above-mentioned step S4 based on the directions from the optimization processing section 10. this time -- the reconstruction image count section 20 -- the optimization processing section 10, the look-up table storing memory 30, the playback field storing memory 40, and the reconstruction image storing memory 50 -- respectively -- since -- information required for reconstruction image count is acquired, complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel ( $m, n$ ) of a reconstruction image is calculated based on such information, and complex amplitude  $H'_{mn}$  of the pixel ( $m, n$ ) of the reconstruction image after change is calculated. The detail of the contents of the processing in this reconstruction image count section 20 is mentioned later.

[0078] The look-up table storing memory 30 is stored from the beginning of optimization processing initiation of the look-up table LUT 3 (the above-mentioned (13) formula) calculated by the optimization processing section 10. The playback field storing memory 40 is stored from the beginning of optimization processing initiation of the set of the positional information  $m$  and  $n$  which shows each pixel ( $m, n$ ) contained in the area of interest  $\omega$  of the reconstruction images. In addition, generally, among target reconstruction images, a pixel value is the field which is not 0 and the area of interest  $\omega$  of the reconstruction images is called for by the optimization processing section 10 based on a target reconstruction image. The reconstruction image storing memory 50 carries out the updating storage of the computer generated hologram which stored in the beginning of optimization processing initiation of the initial value of the computer generated hologram determined by the optimization processing section 10, and was calculated by the reconstruction image count section 20.

[0079] Drawing 2 is a flow chart explaining the reconstruction image computation in the computer hologram listing device and approach concerning this operation gestalt. The flow chart shown in drawing 2 shows the detailed flow of the reconstruction image computation (processing of the above-mentioned step S4) performed in the reconstruction image count section 20 using the above-mentioned (14) formula.

[0080] (S11) The reconstruction image count section 20 first receives the positional information  $j$  and  $k$  which shows the pixel  $(j, k)$  to which phase level changes directions of the purport which should calculate a reconstruction image among the reception from the optimization processing section 10, and the pixel of a large number further contained in a computer hologram and the phase level  $p$  before and behind change of the complex amplitude  $h_{jk}$  of the pixel  $(j, k)$ , and  $p'$  from the optimization processing section 10. (S12) The reconstruction image count section 20 receives the positional information  $m$  and  $n$  which shows each pixel  $(m, n)$  contained in the area of interest  $\omega$  of the reconstruction images from the playback field storing memory 40 again.

[0081] (S13) The reconstruction image count section 20 creates the address values  $adr1 (=ap+bjm+ckn)$  and  $adr2 (=ap'+bjm+ckn)$  for reading these parameters  $p, p'$ , and the data stored in the look-up table storing memory 30 based on  $m, n, j$ , and  $k$ . (S14) The reconstruction image count section 20 reads the data [ LUT / LUT [  $adr1$  ] and / 3 ] 3 [  $adr2$  ] stored in the address concerned from the look-up table storing memory 30. (S15) And the reconstruction image count section 20 calculates complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel  $(m, n)$  of a reconstruction image according to the above-mentioned (14) formula.

[0082] (S16) The reconstruction image count section 20 reads the complex amplitude  $H_{mn}$  of the pixel  $(m, n)$  of the reconstruction image stored in the reconstruction image storing memory 50 based on Parameters  $m$  and  $n$ . (S17) The reconstruction image count section 20 is adding the above-mentioned complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  to this complex amplitude  $H_{mn}$ , calculates complex amplitude  $H'_{mn}$  of the pixel  $(m, n)$  of the reconstruction image after change, and returns this complex amplitude  $H'_{mn}$  to the reconstruction image storing memory 50. (S18) It judges whether the pixel was processed for all in the area of interest  $\omega$  stored in the playback field storing memory 40, and if it is "no", it will return to step S12. (S19) all in the area of interest  $\omega$  stored in the playback field storing memory 40 — after processing is completed about a pixel, the reconstruction image count section 20 outputs a terminate signal to the optimization processing section 10. Then, the optimization processing section 10 receives the updated computer generated hologram which is stored in the reconstruction image storing memory 50, and performs optimization processing.

[0083] It judges whether the above-mentioned (15) formula, the above-mentioned (16) formula, or the above-mentioned (19) formula is materialized about the sum of the phase level  $p$  and  $p'$ . the case where complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel  $(m, n)$  of a reconstruction image is calculated by different formula (the above-mentioned (18) formula or (21) types) based on this decision result — the above-mentioned steps S11 and S12, and S16–S19, although the contents of processing which boil, respectively and can be set are the same as that of the above Step S13–S15 The contents of processing in each differ.

[0084] the time of the above-mentioned (15) formula or the above-mentioned (16) formula being materialized about the sum of the phase level  $p$  and  $p'$  — steps S13–S15 — the contents of processing which boil, respectively and can be set are replaced like the following steps S23–S25. (S23) The reconstruction image count section 20 creates the address values  $adr3 (=ap')$  and  $adr4 (=bjm+ckn)$  for reading these parameter  $p'$  and the data stored in the look-up table storing memory 30 based on  $m, n, j$ , and  $k$ . (S24) The reconstruction image count section 20 reads the data [ LUT / LUT [  $adr3$  ] and / 3 ] 3 [  $adr4$  ] stored in the address concerned from the look-up table storing memory 30. (S25) And the reconstruction image count section 20 calculates complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel  $(m, n)$  of a reconstruction image according to the above-mentioned (18) formula.

[0085] the time of on the other hand the above-mentioned (19) formula being materialized about the sum of the phase level  $p$  and  $p'$  — steps S13–S15 — the contents of processing which boil, respectively and can be set are replaced like the following steps S33–S35. (S33) The reconstruction image count section 20 creates the address values  $adr3 (=ap')$  and  $adr4 (=bjm+ckn)$  for reading these parameter  $p'$  and the data stored in the look-up table storing memory 30 based on  $m, n, j$ , and  $k$ . (S34) The reconstruction image count section 20 reads the data [ LUT / LUT [  $adr3$  ] and / 3 ] 3 [  $adr4$  ] stored in the address concerned from the look-up table storing memory 30. (S35) And the reconstruction image count section 20 calculates complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel  $(m, n)$  of a reconstruction image according to the above-mentioned (21) formula.

[0086] Moreover, when the value of phase level variation  $\Delta \phi$  of the pixel  $(j, k)$  of a computer



hologram is limited and complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image is calculated according to the above-mentioned (24) formula, the look-up table LUT 4 expressed with the above-mentioned (23) formula is stored in the look-up table storing memory 30. the above-mentioned steps S11 and S12, and S16-S19 -- although the contents of processing which boil, respectively and can be set are the same as that of the above -- steps S13-S15 -- the contents of processing which boil, respectively and can be set are replaced like the following steps S43-S45. [ in this case, ] (S43) The reconstruction image count section 20 creates the address value  $adr5 (=Q(p' - p) + ap + bjm + ckn)$  for reading these parameters p, p', and the data stored in the look-up table storing memory 30 based on m, n, j, and k. (S44) The reconstruction image count section 20 reads the data LUT 4 [adr5] stored in the address concerned from the look-up table storing memory 30. (S45) And the reconstruction image count section 20 calculates complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image according to the above-mentioned (24) formula.

[0087] Drawing 3 is the graph which summarized the computational complexity at the time of calculating complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel (m, n) of a reconstruction image. Although the count of memory reference is the same, since there are few counts of real number multiplication and each counts of real number addition and subtraction, the above-mentioned (14) formula using a look-up table LUT 3 as compared with the above-mentioned (9) formula using look-up tables LUT1 and LUT2 has short computation time. moreover -- a phase -- level -- p -- p -- ' -- the sum -- predetermined -- relation -- filling -- a case -- using -- having -- the above -- (-- 18 --) -- a formula -- and -- the above -- (-- 21 --) -- a formula -- each -- memory reference -- a count -- the real number -- multiplication -- a count -- and -- the real number -- addition and subtraction -- a count -- any -- being few -- since -- computation time -- further -- being short . Furthermore, since there are both still few counts of memory reference counts of real number multiplication and counts of real number addition and subtraction, the above-mentioned (24) formula used when the value of phase level variation  $\Delta \phi$  of the pixel (j, k) of a computer hologram is limited has still shorter computation time.

[0088]

[Effect of the Invention] According to this invention, as explained to the detail As mentioned above, the input value q however,  $0 \leq q < Q$ , and q and Q -- each -- an integer -- using the look-up table which outputs the output value LUT [q] by which function value  $\exp(2\pi i q/Q)$  was quantized to the input -- or input-value  $sQ+q$  (however,  $0 \leq q < Q$ ,  $0 \leq s < P$ , and q, Q, s and P -- each -- an integer --) It is a function value to an input.  $[\exp(2\pi i s/P)-1]$  and  $\exp(2\pi i q/Q)$  By using the look-up table which outputs the quantized output value LUT [sQ+q] The amount of operations at the time of calculating a reconstruction image is reduced, and a computer generated hologram is created for a short time.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

## DESCRIPTION OF DRAWINGS

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is the block diagram of the computer generated hologram listing device concerning this operation gestalt.

[Drawing 2] It is a flow chart explaining the reconstruction image computation in the computer hologram listing device and approach concerning this operation gestalt.

[Drawing 3] It is the graph which summarized the computational complexity at the time of calculating complex amplitude variation  $\Delta H_{mn}$  of the pixel of a reconstruction image.

[Description of Notations]

1 [ -- Look-up table storing memory, 40 / -- Playback field storing memory, 50 / -- Reconstruction image storing memory. ] -- A computer generated hologram listing device, 10 -- The optimization processing section, 20 -- The reconstruction image count section, 30

---

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2003-263094  
(P2003-263094A)

(43) 公開日 平成15年9月19日 (2003.9.19)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 3 H 1/08		G 0 3 H 1/08	2 K 0 0 8
G 0 6 T 1/00	2 8 0	G 0 6 T 1/00	2 8 0 5 B 0 5 7

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2002-65924 (P2002-65924)

(22) 出願日 平成14年3月11日 (2002.3.11)

(71) 出願人 000236436

浜松ホトニクス株式会社  
静岡県浜松市市野町1126番地の1

(72) 発明者 井上 卓

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

Fターム(参考) 2K008 AA00 FF27

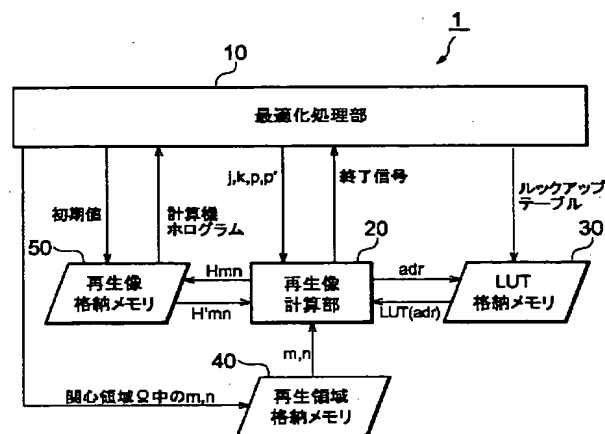
5B057 BA02 BA15 CA08 CA13 CA16  
CB08 CB13 CB16 CH07

(54) 【発明の名称】 計算機ホログラム作成装置および方法

(57) 【要約】

【課題】 計算機ホログラムを短時間に作成することができる計算機ホログラム作成装置および方法を提供する。

【解決手段】 再生像計算部20は、最適化処理部10からの指示に基づいて再生像計算処理を実行する。このとき、再生像計算部20は、最適化処理部10、ルックアップテーブル格納メモリ30、再生領域格納メモリ40および再生像格納メモリ50それぞれから再生像計算に必要な情報を獲得して、これらの情報に基づいて、再生像の画素(m, n)の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を計算し、変化後の再生像の画素(m, n)の複素振幅 $H'_m$ を求める。ルックアップテーブル格納メモリ30は、最適化処理部10により計算されたルックアップテーブルLUT3 ((13)式)を、最適化処理開始の当初より格納している。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機プログラムを最適化法により作成する装置であって、

入力値  $q$  (ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $q$  および  $Q$  それぞれは整数。) の入力に対して関数値  $\exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[q]$  を出力するルックアップテーブル記憶手段と、

前記計算機プログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前の位相値および前記画素の位置に応じた入力値  $q$  に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値および前記画素の位置に応じた入力値  $q'$  に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算する再生像計算手段と、前記計算機プログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて前記再生像計算手段により計算される再生像と前記目標再生像とに基づいて、前記目標再生像を再生する為の前記計算機プログラムを最適化法により作成する最適化処理手段と、を備えることを特徴とする計算機プログラム作成装置。

【請求項2】 前記再生像計算手段は、

前記画素の変化前の位相値  $2\pi p/P$  と変化後の位相値  $2\pi p'/P$  との和  $(2\pi(p+p')/P)$  の値が  $\pi$  または  $3\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値の実数部を得るとともに、前記画素の位置に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値を得て、これらの値に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算し、前記和の値が  $2\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値の虚数部を得るとともに、前記画素の位置に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値を得て、これらの値に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算し、

前記和の値が  $\pi$ 、 $2\pi$  および  $3\pi$  の何れでもないときに、その変化前の位相値  $2\pi p/P$  および前記画素の位置に応じた入力値  $q$  に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値  $2\pi p'/P$  および前記画素の位置に応じた入力値  $q'$  に基づいて前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算する、ことを特徴とする請求項1記載の計算機プログラム作成

装置。

【請求項3】 照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機プログラムを最適化法により作成する装置であって、

入力値  $sQ+q$  (ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $0 \leq s < P$ 、 $q$ 、 $Q$ 、 $s$  および  $P$  それぞれは整数。) の入力に対して、関数値  $[\exp(2\pi i s/P)-1] \cdot \exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[sQ+q]$  を出力するルックアップテーブル記憶手段と、

前記計算機プログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前および変化後それぞれの位相値ならびに前記画素の位置に応じた入力値  $sQ+q$  に基づいて、前記ルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[sQ+q]$  を得て、この出力値  $LUT[sQ+q]$  に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算する再生像計算手段と、前記計算機プログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて前記再生像計算手段により計算される再生像と前記目標再生像とに基づいて、前記目標再生像を再生する為の前記計算機プログラムを最適化法により作成する最適化処理手段と、を備えることを特徴とする計算機プログラム作成装置。

【請求項4】 照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機プログラムを最適化法により作成する方法であって、

入力値  $q$  (ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $q$  および  $Q$  それぞれは整数。) の入力に対して、関数値  $\exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[q]$  を出力するルックアップテーブルを用意し、

前記計算機プログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前の位相値および前記画素の位置に応じた入力値  $q$  に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値および前記画素の位置に応じた入力値  $q'$  に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算し、

前記計算機プログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて計算される再生像と前記目標再生像とに基づいて、前記目標再生像を再生する為の前記計算機プログラムを最適化法により作成する、ことを特徴とする計算機プログラム作成方法。

【請求項5】 前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算する際に、

前記画素の変化前の位相値  $2\pi p/P$  と変化後の位相値  $2\pi p'/P$  との和  $(2\pi(p+p')/P)$  の値が  $\pi$  または  $3\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に

応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値の実数部を得るとともに、前記画素の位置に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値を得て、これらの値に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算し、  
 前記和の値が $2\pi$ であるときには、変化後の位相値 $2\pi p'/P$ に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値の虚数部を得るとともに、前記画素の位置に応じた入力値に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値を得て、これらの値に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算し、  
 前記和の値が $\pi$ 、 $2\pi$ および $3\pi$ の何れでもないときに、その変化前の位相値 $2\pi p/P$ および前記画素の位置に応じた入力値 $q$ に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値 $LUT[q]$ を得るとともに、その変化後の位相値 $2\pi p'/P$ および前記画素の位置に応じた入力値 $q'$ に基づいて前記ルックアップテーブルから出力値 $LUT[q']$ を得て、これら出力値 $LUT[q]$ および $LUT[q']$ に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算する、ことを特徴とする請求項4記載の計算機プログラム作成方法。

【請求項6】 照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機プログラムを最適化法により作成する方法であって、  
 入力値 $sQ+q$ （ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $0 \leq s < P$ 、 $q$ 、 $Q$ 、 $s$ および $P$ それぞれは整数。）の入力に対して、関数値 $[\exp(2\pi i s/P)-1] \cdot \exp(2\pi i q/Q)$ が量子化された出力値 $LUT[sQ+q]$ を出力するルックアップテーブルを用意し、  
 前記計算機プログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前および変化後それぞれの位相値ならびに前記画素の位置に応じた入力値 $sQ+q$ に基づいて、前記ルックアップテーブルから出力値 $LUT[sQ+q]$ を得て、この出力値 $LUT[sQ+q]$ に基づいて、前記計算機プログラムにより再生される再生像を計算しと、  
 前記計算機プログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて計算される再生像と前記目標再生像とに基づいて、前記目標再生像を再生する為の前記計算機プログラムを最適化法により作成する、ことを特徴とする計算機プログラム作成方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機プログラム（位相プログラムまたは複素振幅プログラム）を最適化法により作成する装置および方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 レーザマーキング、レーザ加工、光造形および光ピンセットなどの分野では、レーザ光を所望の形状に形成する画像パターン形成技術が求められている。画像パターン形成技術の1つに、計算機プログラムを用いる技術がある。この技術では、目標とする所望の形状の再生像（目標再生像）を発生し得る計算機プログラムを計算により求めて作成し、この計算機プログラムに照明光を照射して目標再生像を形成する。この計算機プログラムを用いる技術は、ホログラフィ技術を利用するものであるから、自由度が高い。また、計算機プログラムとして位相プログラムを用いれば、光のロスが小さいので、光エネルギーの利用効率が高い。

【0003】 この計算機プログラムの作成は、解析的には行うことができず、反復計算に基づく最適化法により行われる。最適化による計算機プログラムの作成は、或る初期計算機プログラムから開始して反復計算を行って、この計算により求められた計算機プログラムから再生される再生像が目標再生像に近づくように計算機プログラムを逐次更新していく。このような最適化法を用いると、良好な結果が得られる。

【0004】 例えば、文献「A. G. Kirk and T. J. Hall, "Design of binary computer generated holograms by simulated annealing: coding density and reconstruction error," Opt. Comm. Vol.94, pp.491-496 (1992)」に記載された計算機プログラム作成方法では、最適化法としてシミュレーテッドアニーリング（SA: Simulated Annealing）法が用いられている。Kirkらは、プログラム値が2値に制限された二値位相型計算機プログラムの作成にSA法を適用している。その他に計算機プログラムの作成にSA法を適用した様々な文献があるが、その中でも、Kirkらの上記文献は作成時間を短縮するための工夫について明確に言及している。

【0005】 まず、この文献に基づいて構成したSA法を用いた計算機プログラム作成方法の一般的な手順を説明する。その手順では、（S1）計算機プログラムの初期値を決定するとともに、SA法で用いられるパラメータの初期値を決定し、（S2）計算機プログラムに含まれる多数の画素のうち1個または複数個の画素を選択し、（S3）その選択した画素の画素値を変化させ、（S4）画素値を変化させた後の計算機プログラムにより再生される再生像を計算し、（S5）その計算された再生像と目標再生像との誤差を計算し、（S6）その誤差を評価して、選択した画素の画素値の変化（上記ステップS3）を受け入れるか否かを決定し、（S7）計算機プログラムに含まれる全ての画素について上記ステップS2～S6の処理を行ったか否かを判断して、もし「否」であれば上記ステップS2に戻り、（S8）SA法で用いられるパラメータを更新し、（S9）計算を終了してよいか否かを判断して、もし「否」であれば上記ステップS2に戻る。

【0006】このSA法による計算手続は二重のループを有している。そのうちの内側のループ（ステップS2～S7）では、SA法で用いられるパラメータが一定のまま、計算機ホログラムに含まれる画素をスキャンして当該画素値を最適化する。外側のループ（ステップS2～S9）では、SA法で用いられるパラメータを更新しつつ最適化を反復して、最適化の度合いを高めていく。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかし、上記文献に記載されたSA法による計算機ホログラム作成方法は、繰り返し回数と計算量とが共に大きいため、非常に長い時間を要するという問題点がある。

【0008】繰り返し回数についていえば、SA法の内側のループは、計算機ホログラムに含まれる全ての画素について行われることから、繰り返し回数が画素数と同一である。一般に画素数は非常に大きくて、例えばVGA規格液晶モニタ用の計算機ホログラムを作成することを考えると、内側のループの繰り返し回数は30万回以上にものなる。さらに、程度の良い解を得るためには、ステップS2～S9の外側のループを多数回繰り返す必要がある。このように、外側および内側の双方のループの繰り返し回数が大きいため、作成時間が長くなる。

【0009】画素数が増大するとさらに作成時間が長くなる。近年では、プロセス技術の発展により、ホログラム表示に用いることのできるデバイスの画素数が急激なピッチで増加している。ホログラムの画素数が増加すると、内側のループにおける画素スキャンの為の反復回数も増加する。また、上記ステップS4における再生像計算量も増加する。さらに、自由度が高くなることから、外側のループにおける最適化の為の反復回数が増加する。このように、計算機ホログラムの画素数が増加すると、ホログラム作成時間が急激に増加することになる。

【0010】ホログラム値が多レベルになっても計算時間が増大する。Kirkらの上記文献では、SA法を用いて2値ホログラムを作成したが、2値ホログラムの場合は、ステップ4の計算量が少ないため、もともと全体の計算量が比較的少ない。また、自由度が低いため、繰り返し回数も比較的少なく済む。これに対して、ホログラム値が多値の場合は、ステップS4の計算量が2値の場合の2倍以上になる。さらに、自由度が高くなるため、外側ループの繰り返し回数が増大する。この2つの効果から、ホログラム値のレベル数が増えると、ホログラム作成時間が急激に増えることになる。

【0011】Kirkらの上記文献では、ステップS4における再生像の計算において、不要な計算を排除することと、ルックアップテーブルを利用することの2つの工夫により、再生像計算の高速化を計っている。前者は多値ホログラムにも適用可能である。しかし残念ながら、彼らのルックアップテーブルについては、二値ホログラムを対象として考案されているので、多値のホログラムに

適用しても作成時間を大幅に削減することはできない。

【0012】このように、SA法はもともと計算に時間のかかる手法である上、画素数の増大やホログラム値のレベル数の増大に伴って、作成所要時間が急激に増加する。作成所要時間が長いことは、実用化の際の大きな障害となる。また、多値ホログラムの場合には、Kirkらの文献に記されたルックアップテーブルを用いても、十分な高速化は期待できない。

【0013】本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、計算機ホログラムを短時間に作成することができる計算機ホログラム作成装置および方法を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】本発明に係る計算機ホログラム作成装置は、照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する装置であって、(1) 入力値 $q$ （ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $q$ および $Q$ それぞれは整数。）の入力に対して、関数値  $\exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[q]$  を出力するルックアップテーブル記憶手段と、(2) 計算機ホログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前の位相値および画素の位置に応じた入力値 $q$ に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値および画素の位置に応じた入力値 $q'$ に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算する再生像計算手段と、(3) 計算機ホログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて再生像計算手段により計算される再生像と目標再生像とに基づいて、目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する最適化処理手段と、を備えることを特徴とする。

【0015】また、本発明に係る計算機ホログラム作成方法は、照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する方法であって、

(1) 入力値 $q$ （ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $q$ および $Q$ それぞれは整数。）の入力に対して、関数値  $\exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[q]$  を出力するルックアップテーブルを用意し、(2) 計算機ホログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前の位相値および画素の位置に応じた入力値 $q$ に基づいてルックアップテーブルから出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値および画素の位置に応じた入力値 $q'$ に基づいてルックアップテーブルから出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、計算機ホログラムにより再生され

る再生像を計算し、(3) 計算機ホログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて計算される再生像と目標再生像とに基づいて、目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する、ことを特徴とする。

【0016】上記の本発明に係る計算機ホログラム作成装置と本発明に係る計算機ホログラム作成方法とは、互いに同一の技術的思想に基づくものである。本発明では、上述したようなルックアップテーブルを用意しておくことにより、再生像を計算する際の演算量が削減され、計算機ホログラムが短時間に作成される。

【0017】本発明に係る計算機ホログラム作成装置は、再生像計算手段が、(1) 画素の変化前の位相値  $2\pi p/P$  と変化後の位相値  $2\pi p'/P$  との和  $(2\pi(p+p')/P)$  の値が  $\pi$  または  $3\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に応じた入力値に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値の実数部を得るとともに、画素の位置に応じた入力値に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値を得て、これらの値に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算し、(2) 和の値が  $2\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に応じた入力値に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値の虚数部を得るとともに、画素の位置に応じた入力値に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値を得て、これらの値に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算し、(3) 和の値が  $\pi$ 、 $2\pi$  および  $3\pi$  の何れでもないときに、その変化前の位相値  $2\pi p/P$  および画素の位置に応じた入力値  $q$  に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値  $2\pi p'/P$  および画素の位置に応じた入力値  $q'$  に基づいてルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算する、ことを特徴とする。

【0018】また、本発明に係る計算機ホログラム作成方法は、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算する際に、(1) 画素の変化前の位相値  $2\pi p/P$  と変化後の位相値  $2\pi p'/P$  との和  $(2\pi(p+p')/P)$  の値が  $\pi$  または  $3\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に応じた入力値に基づいてルックアップテーブルから出力値の実数部を得るとともに、画素の位置に応じた入力値に基づいてルックアップテーブルから出力値を得て、これらの値に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算し、(2) 和の値が  $2\pi$  であるときには、変化後の位相値  $2\pi p'/P$  に応じた入力値に基づいてルックアップテーブルから出力値の虚数部を得るとともに、画素の位置に応じた入力値に基づいてルックアップテーブルから出力値を得て、これらの値に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を

計算し、(3) 和の値が  $\pi$ 、 $2\pi$  および  $3\pi$  の何れでもないときに、その変化前の位相値  $2\pi p/P$  および画素の位置に応じた入力値  $q$  に基づいてルックアップテーブルから出力値  $LUT[q]$  を得るとともに、その変化後の位相値  $2\pi p'/P$  および画素の位置に応じた入力値  $q'$  に基づいてルックアップテーブルから出力値  $LUT[q']$  を得て、これら出力値  $LUT[q]$  および  $LUT[q']$  に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算する、ことを特徴とする。

10 【0019】このように、画素の変化前の位相値  $2\pi p/P$  と変化後の位相値  $2\pi p'/P$  との和  $(2\pi(p+p')/P)$  の値が  $\pi$ 、 $2\pi$  および  $3\pi$  の何れかの場合には、再生像を計算する際の演算量が更に削減され、計算機ホログラムが更に短時間に作成される。

【0020】本発明に係る他の計算機ホログラム作成装置は、照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する装置であって、(1) 入力値  $sQ+q$  (ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $0 \leq s < P$ 、 $q$ 、 $Q$ 、 $s$  および  $P$  それぞれは整数。) の入力に対して、関数値  $[\exp(2\pi i s/P) - 1] \cdot \exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[sQ+q]$  を出力するルックアップテーブル記憶手段と、(2) 計算機ホログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前および変化後それぞれの位相値ならびに画素の位置に応じた入力値  $sQ+q$  に基づいて、ルックアップテーブル記憶手段から出力値  $LUT[sQ+q]$  を得て、この出力値  $LUT[sQ+q]$  に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算する再生像計算手段と、(3) 計算機ホログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に応じて再生像計算手段により計算される再生像と目標再生像とに基づいて、目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する最適化処理手段と、を備えることを特徴とする。

30 【0021】また、本発明に係る他の計算機ホログラム作成方法は、照明光の入射により少なくとも位相が変調された再生光を生じさせて目標再生像を再生する為の計算機ホログラムを最適化法により作成する方法であって、(1) 入力値  $sQ+q$  (ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $0 \leq s < P$ 、 $q$ 、 $Q$ 、 $s$  および  $P$  それぞれは整数。) の入力に対して、関数値  $[\exp(2\pi i s/P) - 1] \cdot \exp(2\pi i q/Q)$  が量子化された出力値  $LUT[sQ+q]$  を出力するルックアップテーブルを用意し、(2) 計算機ホログラムに含まれる何れかの画素の位相値の変化に応じて、その変化前および変化後それぞれの位相値ならびに画素の位置に応じた入力値  $sQ+q$  に基づいて、ルックアップテーブルから出力値  $LUT[sQ+q]$  を得て、この出力値  $LUT[sQ+q]$  に基づいて、計算機ホログラムにより再生される再生像を計算し、(3) 計算機ホログラムに含まれる各画素の位相値を変化させ、この変化に

じて計算される再生像と目標再生像とに基づいて、目標再生像を再生する為の計算機プログラムを最適化法により作成する、ことを特徴とする。

【0022】上記の本発明に係る計算機プログラム作成装置と本発明に係る計算機プログラム作成方法とは、互いに同一の技術的思想に基づくものである。本発明では、上述したようなルックアップテーブルを用意しておくことにより、再生像を計算する際の演算量が更に削減され、計算機プログラムが更に短時間に作成される。

【0023】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0024】先ず、本実施形態に係る計算機プログラム作成装置および方法における再生像計算処理（上記ステップS4の処理）について説明する。計算機プログラムがフーリエ変換プログラムである場合には、計算機プログラムにより再生される再生像は、計算機プログラムをフーリエ変換することによって得られる。このフーリエ変換による計算には、高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）や離散フーリエ変換（DFT：Discrete Fourier Transform）が用いられる。一般に、データ数をVとすると、FFTにより再生像を計算する際の計算量は $V \cdot \log V$ に比例するのに対して、DFTにより再生像を計算する際の計算量は $V^2$ に比例するので、FFTの方が高速である。

【0025】しかし、SA法等の最適化法では、上述したように、（S2）計算機プログラムに含まれる多数の画素のうち1個または複数個の画素を選択し、（S3）その選択した画素の画素値を変化させ、（S4）画素値を変化させた後の計算機プログラムにより再生される再生像をフーリエ変換により計算することから、画素値が変化した画素についてのみ計算すればよい。したがって、この場合には、DFTにより再生像を計算する際の計算量はVに比例するので、DFTの方が高速である。また、DFTによる計算の際にルックアップテーブルを用いることで、再生像を短時間に計算することができる。

【0026】さらに、FFTでは、再生面上の再生像に含まれる全ての画素が同時に計算されるので、再生像の一部のみが必要である場合であっても、再生像に含まれる全ての画素を計算しなければならない。一方、DFTでは、再生像に含まれる各画素は独立に計算されるので、再生像の一部のみが必要である場合には、その必要な画素についてのみ計算すればよい。すなわち、DFTによる再生像の計算に際しては、再生像のうちの関心領域に含まれる画素についてのみ計算すればよい。再生像の全画素数をVとし、関心領域内の画素数をUとすると、DFTによる関心領域の計算量はUに比例し、内側

のループ（ステップS2～S7）における計算量はV・Uに比例する。なお、再生像のうちの関心領域は、応用によって異なるが、一般には、画素値が0でない領域である。

【0027】本実施形態に係る計算機プログラム作成方法は、以上に説明した考えに基づくものであって、ルックアップテーブルを用いてDFTにより再生像を計算し、この計算された再生像と目標再生像とに基づいて、目標再生像を再生する為の計算機プログラムを最適化法により作成するものである。なお、最適化法として、既述したSA法その他、遺伝的アルゴリズム（GA：Genetic Algorithm）法やフーリエ変換反復法が用いられる。以下では、DFTによる再生像の計算の際に参照されるルックアップテーブルについて主に説明する。

【0028】作成されるべき計算機プログラムの画素数を $M \times N$ とする。計算機プログラムにおける第j行第k列（ $1 \leq j \leq M$ ,  $1 \leq k \leq N$ ）に位置する画素（以下では、この画素を「画素（j, k）」と表記する。）の複素振幅を $h_{jk}$ の如く表記する。また、再生面上の再生像における第m行第n列（ $1 \leq m \leq M$ ,  $1 \leq n \leq N$ ）に位置する画素（以下では、この画素を「画素（m, n）」と表記する。）の光の複素振幅を $H_m$ の如く表記する。計算機プログラムの画素（j, k）の複素振幅が $h_{jk}$ から $h'_{jk}$ へ変化すると、再生像上の画素（m, n）の光の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ は、

【0029】

【数1】

$$\Delta H_m = \Delta h_{jk} \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{jm}{M} + \frac{kn}{N} \right) \right] \quad \cdots (1)$$

なる式で表される。ここで、iは虚数単位を表す。また、 $\Delta h_{jk}$ は、計算機プログラムの画素（j, k）の複素振幅変化量を表し、

【0030】

【数2】

$$\Delta h_{jk} = h'_{jk} - h_{jk} \quad \cdots (2)$$

なる式で表される。

【0031】上記(1)式から判るように、再生像上の各画素（m, n）の光の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ は、計算機プログラムの画素（j, k）の複素振幅変化量 $\Delta h_{jk}$ のみに依存している。このような変化の後の再生像上の画素（m, n）の光の複素振幅 $H'_m$ は、変化前の複素振幅 $H_m$ に対して、

【0032】

【数3】

$$H'_m = H_m + \Delta H_m \quad \cdots (3)$$

なる式で表される。したがって、再生像上の各画素（m, n）の光の複素振幅 $H_m$ は、最初に1回だけ計算しておけば、後は変化量 $\Delta H_m$ を加算していくだけでよい。



【0033】SA法等の最適化法では、以上のようにして計算された再生像と目標再生像との誤差Cを計算し、その誤差Cを評価して、選択した画素の画素値の変化を受け入れるか否かを決定する。この誤差Cの計算に際しては、再生像のうちの関心領域Ω内においてのみ、

【0034】

【数4】

$$C = \sum_{m,n \in \Omega} \{ |F_m|^2 - |H_m|^2 \} \quad \dots (4)$$

なる二乗和を求めればよい。ここで、 $F_m$  は目標再生像上の画素 (m, n) の光の複素振幅である。なお、目標再生像のエネルギー (全ての画素の光の複素振幅の二乗和) を入力光のエネルギー ( $h_{jk}$  の絶対値の二乗和) と等しくしておけば、上記(4)式のように計算範囲を関心領域Ω内に制限しても、最適化の結果には殆ど影響を与えない。

【0035】上記(1)式の右辺のexp関数は、実数部がcos関数を用いて計算され、虚数部がsin関数を用いて計算される。これらcos関数およびsin関数それぞれの計算に替えて、予め用意したルックアップテーブルを参照することにより、上記(1)式の右辺のexp関数の値を短時間に求めることができる。整数MおよびNの最小公倍数L ( $L = dM = eN$ , dおよびeそれぞれは整数。)を用いると、ここで用いられるルックアップテーブルLUT1は、

【0036】

【数5】

$$LUT1[djm + ekn] = \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{djm + ekn}{L} \right) \right] \quad \dots (5)$$

なる式で表される。なお、Kirkらの文献では、(1)式右辺の指数関数部をルックアップテーブル化している。彼らの場合は、ホログラムが2値であり $\Delta h_{jk}$ が2および-2の2つの値しかもたないので、これで十分に高速化の効果が現れた。しかし、多値の場合には、本実施形態のように $\Delta h_{jk}$ の部分も含めてルックアップテーブル化しないと大きな効果が期待できない。

【0037】計算機ホログラムでは、各画素 (j, k) の複素振幅 $h_{jk}$ は、強度および位相の双方または何れか一方が標本化され量子化される。したがって、上記(1)式の指数関数部だけでなく複素振幅変化量 $\Delta h_{jk}$ も、予め用意したルックアップテーブルを参照することにより求めることができる。

【0038】作成しようとする計算機ホログラムが強度ホログラムである場合には、計算機ホログラムの各画素 (j, k) の複素振幅 $h_{jk}$  および $h'_{jk}$  それぞれは量子化された実数である。したがって、この場合には、複素振幅変化量 $\Delta h_{jk}$ のルックアップテーブルを容易に作成することができる。また、上記(1)式の右辺の計算は、実数と複素数との積となるから、ルックアップテーブルを記憶したメモリの参照が3回であって、実数の乗算が

2回であり、演算数が少ない。

【0039】作成しようとする計算機ホログラムが位相ホログラムである場合には、計算機ホログラムの各画素 (j, k) の複素振幅 $h_{jk}$  および $h'_{jk}$  それぞれは、振幅強度が一定の実数値であって、位相が量子化されていて、複素数である。計算機ホログラムが複素振幅ホログラムである場合には、計算機ホログラムの各画素 (j, k) の複素振幅 $h_{jk}$  および $h'_{jk}$  それぞれは、振幅強度および位相の双方が量子化されていて、複素数である。

【0040】計算機ホログラムが位相ホログラムまたは複素振幅ホログラムである場合に、計算機ホログラムの各画素 (j, k) の複素振幅 $h_{jk}$ の位相が $0 \sim 2\pi$ の範囲でP個のレベルで量子化されているものとする。計算機ホログラムの各画素 (j, k) の複素振幅 $h_{jk}$ の位相レベルがp (ただし、 $0 \leq p < P$ , pおよびPそれぞれは整数。)であるとき、すなわち、位相値が $2\pi p/P$ であるとき、その複素振幅 $h_{jk}$ は、

【0041】

【数6】

$$h_{jk} = A_{jk} \exp \left( 2\pi i \frac{p}{P} \right) \quad \dots (6)$$

なる式で表される。ここで、 $A_{jk}$ は、実数値であり、計算機ホログラムの画素 (j, k) からの再生光の振幅強度を表す。

【0042】最適化法の過程で計算機ホログラムの画素 (j, k) の複素振幅の位相レベルがpからp'へ変化したとすると、上記(2)式の計算機ホログラムの画素 (j, k) の複素振幅変化量 $\Delta h_{jk}$ は、

【0043】

【数7】

$$\Delta h_{jk} = A_{jk} \left\{ \exp \left( 2\pi i \frac{p'}{P} \right) - \exp \left( 2\pi i \frac{p}{P} \right) \right\} \quad \dots (7)$$

なる式で表される。この(7)式の右辺の括弧内はルックアップテーブル化が可能である。この場合のルックアップテーブルLUT2は、

【0044】

【数8】

$$LUT2[p', p] = \exp \left( 2\pi i \frac{p'}{P} \right) - \exp \left( 2\pi i \frac{p}{P} \right) \quad \dots (8)$$

なる式で表される。そして、上記(1)式の再生像の画素 (m, n) の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ は、ルックアップテーブルLUT1およびLUT2を用いて、

【0045】

【数9】

$$\Delta H_m = A_{jk} LUT2[p', p] LUT1[djm + ekn] \quad \dots (9)$$

なる式で表される。

【0046】ルックアップテーブルLUT1およびLUT2それぞれの出力値は複素数であるので、この(9)式の右辺では、複素数と複素数との乗算を行うことになる。また、上記(9)式の右辺を計算するには、 $A_{jk}$ のル

ックアップテーブルの参照、上記ルックアップテーブルLUT1の実数部および虚数部それぞれの参照、および、上記ルックアップテーブルLUT2の実数部および虚数部それぞれの参照が必要である。したがって、上記(9)式の右辺の計算では、ルックアップテーブルを記憶したメモリの参照が5回であって、実数の乗算が4回であり、実数の加減算が4回である。このように、上記(9)式に従って計算することで、再生像の画素(m, n)の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を更に短時間に求めることができる。

$$\Delta H_m = A_{jk} \left\{ \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{p'}{P} + \frac{jm}{M} + \frac{kn}{N} \right) \right] - \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{p}{P} + \frac{jm}{M} + \frac{kn}{N} \right) \right] \right\} \quad \dots (10)$$

なる式が得られる。そして、P、MおよびNの最小公倍数をQとして、

【0049】

【数11】

$$Q = aP = bM = cN \quad \dots (11)$$

$$\Delta H_m = A_{jk} \left\{ \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{ap' + bjm + ckn}{Q} \right) \right] - \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{ap + bjm + ckn}{Q} \right) \right] \right\} \quad \dots (12)$$

と表される。

【0051】この(12)式の右辺にある2つのexp関数それぞれは、その位相が0～2πの範囲でQ個のレベルで量子化されており、1つのルックアップテーブルに置き換えることができる。ここで用いられるルックアップテーブルLUT3は、

【0052】

【数13】

$$\Delta H_m = A_{jk} \{ LUT3[ap' + bjm + ckn] - LUT3[ap + bjm + ckn] \} \quad \dots (14)$$

と表される。

【0054】上記(14)式の右辺を計算するには、 $A_{jk}$ のルックアップテーブルの参照、および、上記ルックアップテーブルLUT3の実数部および虚数部それぞれの参照が必要である。したがって、上記(14)式の右辺の計算では、ルックアップテーブルを記憶したメモリの参照が5回であって、実数の乗算が2回であり、実数の加減算が2回である。このように、上記(14)式に従って計算することで、上記(9)式に従う場合よりも、再生像の画素(m, n)の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を更に短時間に求めることができる。

【0055】また、計算機ホログラムの画素(j, k)の複素振幅 $h_{jk}$ の位相レベルp, p'それぞれの値の組み合わせによっては、計算機ホログラムの画素(j, k)の複素振幅 $h_{jk}$ が実数または虚数になるので、この複素振幅 $h_{jk}$ が実数、虚数およびその他の何れであるかによって場合分けして計算することで、再生像の画素(m, n)の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を更に短時間に求めることができる。

【0056】すなわち、計算機ホログラムの画素(j, k)の複素振幅 $h_{jk}$ の位相レベルp, p'それぞれの値は0以上P未満の整数であるから、

\* n)の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を短時間に求めることができる。

【0047】しかし、以下のようにルックアップテーブルを工夫することで、再生像の画素(m, n)の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を更に短時間に求めることができる。すなわち、上記(7)式を上記(1)式に代入すると、

【0048】

【数10】

※とする。ここで、a, bおよびcそれぞれは整数である。このQを用いると、上記(10)式は、

【0050】

【数12】

20★

$$LUT3[q] = \exp \left( 2\pi i \frac{q}{Q} \right) \quad \dots (13)$$

なる式で表される。ただし、 $0 \leq q < Q$ で、qおよびQそれぞれは整数である。このルックアップテーブルLUT3を用いれば、上記(12)式は、

【0053】

【数14】

【0057】

【数15】

$$p' + p = \frac{P}{2} \quad \dots (15)$$

および

【0058】

【数16】

$$p' + p = \frac{3P}{2} \quad \dots (16)$$

の何れかの関係式が満たされる場合には、計算機ホログラムの画素(j, k)の複素振幅変化量 $\Delta h_{jk}$ は、実数であり、

【0059】

【数17】

$$\Delta h_{jk} = 2 \cos \left( 2\pi \frac{p'}{P} \right) \quad \dots (17)$$

なる式で表される。このとき、上記(12)式は、

【0060】

【数18】

$$\Delta H_m = A_{jk} \operatorname{Re} \{ LUT3[ap'] LUT3[bjm + ckn] \} \quad \dots (18)$$

と表される。なお、この(18)式において $\operatorname{Re}[\cdot]$ は実数部のみを参照する操作を表す。

【0061】一方、  
【0062】  
【数19】

$$p' + p = P \quad \dots (19)$$

なる関係式が満たされる場合には、計算機プログラムの画素 (j, k) の複素振幅変化量  $\Delta h_{jk}$  は、虚数であり、

【0063】  
【数20】

$$\Delta h_{jk} = 2i \sin \left( 2\pi \frac{p'}{P} \right) \quad \dots (20)$$

なる式で表される。このとき、上記(12)式は、

【0064】  
【数21】

$$\Delta H_{mn} = iA_{jk} \operatorname{Im} \{ LUT3[ap'] LUT3[bjm + ckn] \} \quad \dots (21)$$

と表される。なお、この(21)式において  $\operatorname{Im}[\cdot]$  は虚数部のみを参照する操作を表す。

【0065】上記(18)式の右辺を計算するには、 $A_{jk}$  のルックアップテーブルの参照、および、上記ルックアップテーブル LUT 3 の実数部の参照が必要である。また、上記(21)式の右辺を計算するには、 $A_{jk}$  のルックアップテーブルの参照、および、上記ルックアップテーブル \*

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} \left[ \exp \left( \frac{2\pi i \Delta p}{P} \right) - 1 \right] \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{ap + bj m + ck n}{Q} \right) \right] \quad \dots (22)$$

なる式で表される。ここで、位相レベル  $p$  および  $p'$  それぞれは 0 から  $P-1$  までの整数であるので、位相レベル変化量  $\Delta p$  は、 $-P+1$  から  $P-1$  までの整数である。ただし、複素指数関数の性質から  $\exp[-ix] = \exp[i(2\pi - x)]$  であるので、上記(22)式中の  $[\exp(2\pi i \Delta p/P) - 1]$  については、位相レベル変化量  $\Delta p$  に関

$$LUT4[s, q] = LUT4[sQ + q] = \left[ \exp \left( \frac{2\pi i s}{P} \right) - 1 \right] \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{q}{Q} \right) \right] \quad \dots (23)$$

なる式で表されるルックアップテーブル LUT 4 を用意することで、再生像の画素 (m, n) の複素振幅変化量  $\Delta H_{mn}$  は、

【0070】  
【数24】

$$\Delta H_{mn} = A_{jk} LUT4[sQ + q] \quad \dots (24)$$

なる式で表される。ただし、 $s$  は、 $\Delta p$  が正である場合は  $\Delta p$  であり、 $\Delta p$  が負である場合は  $P - \Delta p$  で計算され、何れの場合にも 0 から  $P-1$  までの整数である。また、 $LUT4'[\cdot, \cdot]$  は 2 次元配列を意味し、 $LUT4[\cdot]$  はこれを 1 次元配列で表したものである。

【0071】上記(24)式の右辺を計算するには、 $A_{jk}$  のルックアップテーブルの参照、および、上記ルックアップテーブル LUT 4 の実数部および虚数部それぞれの参照が必要である。したがって、上記(24)式の右辺の計算

\* ル LUT 3 の虚数部の参照が必要である。したがって、上記(19)式または上記(21)式の右辺の計算では、ルックアップテーブルを記憶したメモリの参照が 4 回であって、実数の乗算が 3 回であり、実数の加減算が不要である。このように、上記(15)式または上記(16)式が成立するときには上記(18)式に従って計算し、上記(19)式が成立するときには上記(21)式に従って計算することで、再生像の画素 (m, n) の複素振幅変化量  $\Delta H_{mn}$  を更に短時間に求めることができる。なお、上記(15)式、上記(16)式および上記(19)式の何れも成立しないときには、再生像の画素 (m, n) の複素振幅変化量  $\Delta H_{mn}$  を上記(14)式に従って計算する。

【0066】さらに、最適化法 (特に SA 法) において、計算機プログラムの画素 (j, k) の位相レベル変化量  $\Delta p$  ( $= p' - p$ ) の値が限定されている場合があり、この場合には、以下のようにルックアップテーブルを工夫することで、再生像の画素 (m, n) の複素振幅変化量  $\Delta H_{mn}$  を更に短時間に求めることができる。すなわち、この場合には、上記(12)式は、

【0067】  
【数22】

※し 0 から  $P-1$  までの範囲でルックアップテーブルを用意すればよい。

【0068】したがって、 $q = p + b j m + c k n$  と表し ( $0 \leq q < Q$ )、

【0069】  
【数23】

では、ルックアップテーブルを記憶したメモリの参照が 3 回であって、実数の乗算が 2 回であり、実数の加減算が不要である。このように、計算機プログラムの画素 (j, k) の位相レベル変化量  $\Delta p$  の値が限定されている場合には、上記(24)式に従って計算することで、再生像の画素 (m, n) の複素振幅変化量  $\Delta H_{mn}$  を更に短時間に求めることができる。

【0072】なお、各ルックアップテーブルは、実数部および虚数部を含むものであるであって、実数部が  $\cos$  関数を用いて計算される値であり、虚数部が  $\sin$  関数を用いて計算される値である。このことを利用すれば、各ルックアップテーブルのサイズを小さくすることができる。例えば、 $\cos(x) = \sin(x - \pi)$  なる関係を利用すれば、各ルックアップテーブルは、実数部と虚数部とを統合することができ、サイズが  $1/2$  になる。また、 $\cos(x) = -\cos(x - \pi)$  および  $\cos(x) = \cos(-x)$  なる関係

を利用すれば、各ルックアップテーブルはサイズが1/4になる。これらの方法を同時に採用すれば、各ルックアップテーブルはサイズが1/8になる。ただし、この方法はルックアップテーブルLUT4には適用できない。

【0073】また、SA法では、内側のループ（ステップS2～S7）における1回の探索操作において、計算機ホログラムにおいて画素値を変化させる画素は1つであるのが通常であるが、同時に複数の画素の画素値を変化させる場合がある。また、GA法では、1回の探索操作において同時に複数の画素の画素値を変化させる。このように1回の探索操作において同時に複数の画素の画素値を変化させる場合には留意を要する。すなわち、本実施形態による再生像の計算時間は、（再生像における関心領域 $\Omega$ の画素数） $\times$ （計算機ホログラムにおいて画素値が変化する画素数）の値に比例する。計算機ホログラムにおいて画素値が変化する画素数が多い場合には、FFTによる計算時間と比べて、本実施形態のFFTによる再生像の計算時間が長くなる場合があり得る。一方、FFTによる計算時間および本実施形態のFFTによる計算時間それぞれは予め測定することができる。したがって、FFTによる計算時間と比べて本実施形態のFFTによる計算時間が長くなると予想される場合には、FFTを用いて再生像を計算し、そうでない場合には、本実施形態のFFTを用いて再生像を計算するようになればよい。

【0074】以上では、本実施形態に係る計算機ホログラム作成装置および方法における再生像計算処理の理論面を中心に説明した。次に、本実施形態に係る計算機ホログラム作成装置の構成および動作について説明するとともに、本実施形態に係る計算機ホログラム作成方法について説明する。図1は、本実施形態に係る計算機ホログラム作成装置1の構成図である。

【0075】本実施形態に係る計算機ホログラム作成装置1は、上述したルックアップテーブルLUT3またはLUT4を参照してFFTにより再生像を計算し、この計算した再生像と目標再生像との誤差を評価し、この誤差に基づいて計算機ホログラムを最適化していった、目標再生像を再生し得る計算機ホログラムを作成するものである。計算機ホログラム作成装置1は、最適化処理部10、再生像計算部20、ルックアップテーブル格納メモリ30、再生領域格納メモリ40および再生像格納メモリ50を備えている。

【0076】最適化処理部10は、上記ステップS1～S3、S5～S9の処理を実行するとともに、再生像計算部20に対して再生像計算（上記ステップS4の処理）を実行するよう指示する。最適化処理部10は、再生像計算部20による再生像計算に必要なルックアップテーブルを、ルックアップテーブル格納メモリ30に格納する。最適化処理部10は、再生像計算部20による

再生像計算の際に計算すべき再生像のうちの関心領域 $\Omega$ に含まれる各画素（ $m$ ， $n$ ）を示す位置情報 $m$ ， $n$ を、目標再生像に基づいて求めて、再生領域格納メモリ40に格納する。最適化処理部10は、計算機ホログラムの初期値を決定して再生像格納メモリ50に格納する。また、最適化処理部10は、再生像計算の処理が終了した旨を示す終了信号を再生像計算部20から受け取り、再生像格納メモリ50に格納されている更新された計算機ホログラムを受け取って、最適化処理を行う。

【0077】再生像計算部20は、最適化処理部10からの指示に基づいて上記ステップS4の処理を実行する。このとき、再生像計算部20は、最適化処理部10、ルックアップテーブル格納メモリ30、再生領域格納メモリ40および再生像格納メモリ50それぞれから再生像計算に必要な情報を獲得して、これらの情報に基づいて、再生像の画素（ $m$ ， $n$ ）の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を計算し、変化後の再生像の画素（ $m$ ， $n$ ）の複素振幅 $H'_m$ を求める。この再生像計算部20における処理の内容の詳細は後述する。

【0078】ルックアップテーブル格納メモリ30は、最適化処理部10により計算されたルックアップテーブルLUT3（上記(13)式）を、最適化処理開始の当初より格納している。再生領域格納メモリ40は、再生像のうちの関心領域 $\Omega$ に含まれる各画素（ $m$ ， $n$ ）を示す位置情報 $m$ ， $n$ の集合を、最適化処理開始の当初より格納している。なお、再生像のうちの関心領域 $\Omega$ は、一般には目標再生像のうち画素値が0でない領域であり、目標再生像に基づいて最適化処理部10により求められたものである。再生像格納メモリ50は、最適化処理部10により決定された計算機ホログラムの初期値を最適化処理開始の当初に格納し、また、再生像計算部20により計算された計算機ホログラムを更新記憶する。

【0079】図2は、本実施形態に係る計算機ホログラム作成装置および方法における再生像計算処理を説明するフローチャートである。図2に示したフローチャートは、上記(14)式を用いて再生像計算部20において行われる再生像計算処理（上記ステップS4の処理）の詳細なフローを示すものである。

【0080】（S11）まず、再生像計算部20は、再生像を計算すべき旨の指示を最適化処理部10から受け取り、さらに、計算機ホログラムに含まれる多数の画素のうち位相レベルが変化する画素（ $j$ ， $k$ ）を示す位置情報 $j$ ， $k$ 、および、その画素（ $j$ ， $k$ ）の複素振幅 $h_{jk}$ の変化前後の位相レベル $p$ ， $p'$ を、最適化処理部10から受け取る。（S12）また、再生像計算部20は、再生像のうちの関心領域 $\Omega$ に含まれる各画素（ $m$ ， $n$ ）を示す位置情報 $m$ ， $n$ を、再生領域格納メモリ40から受け取る。

【0081】（S13）再生像計算部20は、これらのパラメータ $p$ ， $p'$ ， $m$ ， $n$ ， $j$ および $k$ に基づいて、

ルックアップテーブル格納メモリ30に格納されているデータを読み出す為のアドレス値 $adr1 (= ap + bjm + ckn)$ および $adr2 (= ap' + bjm + ckn)$ を作成する。(S14)再生像計算部20は、当該アドレスに格納されているデータ $LUT3[adr1]$ および $LUT3[adr2]$ をルックアップテーブル格納メモリ30より読み出す。(S15)そして、再生像計算部20は、再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を上記(14)式に従って計算する。

【0082】(S16)再生像計算部20は、パラメータ $m$ および $n$ に基づいて、再生像格納メモリ50に格納されている再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅 $H_m$ を読み出す。(S17)再生像計算部20は、この複素振幅 $H_m$ に上記複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を加算することで、変化後の再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅 $H'_m$ を求めて、この複素振幅 $H'_m$ を再生像格納メモリ50に戻す。(S18)再生領域格納メモリ40に格納されている関心領域 $\Omega$ 内の全て画素について処理を行ったか否かを判断し、もし「否」であればステップS12に戻る。(S19)再生領域格納メモリ40に格納されている関心領域 $\Omega$ 内の全て画素について処理が終了すると、再生像計算部20は、最適化処理部10に対して終了信号を出力する。その後、最適化処理部10は、再生像格納メモリ50に格納されている更新された計算機ホログラムを受け取って、最適化処理を行う。

【0083】位相レベル $p$ と $p'$ との和について上記(15)式、上記(16)式または上記(19)式が成立するか否かを判断して、この判断結果に基づいて、再生像の画素

$(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を、異なる式(上記(18)式または(21)式)で計算する場合には、上記ステップS11、S12およびS16～S19それぞれにおける処理内容は上記と同様であるが、ステップS13～S15それぞれにおける処理内容は異なる。

【0084】位相レベル $p$ と $p'$ との和について上記(15)式または上記(16)式が成立するときには、ステップS13～S15それぞれにおける処理内容は、以下のステップS23～S25のように置き換えられる。(S23)

再生像計算部20は、これらのパラメータ $p'$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $j$ および $k$ に基づいて、ルックアップテーブル格納メモリ30に格納されているデータを読み出す為のアドレス値 $adr3 (= ap')$ および $adr4 (= bjm + ckn)$ を作成する。(S24)再生像計算部20は、当該アドレスに格納されているデータ $LUT3[adr3]$ および $LUT3[adr4]$ をルックアップテーブル格納メモリ30より読み出す。(S25)そして、再生像計算部20は、再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を上記(18)式に従って計算する。

【0085】一方、位相レベル $p$ と $p'$ との和について上記(19)式が成立するときには、ステップS13～S15それぞれにおける処理内容は、以下のステップS33

～S35のように置き換えられる。(S33)再生像計算部20は、これらのパラメータ $p'$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $j$ および $k$ に基づいて、ルックアップテーブル格納メモリ30に格納されているデータを読み出す為のアドレス値 $adr3 (= ap')$ および $adr4 (= bjm + ckn)$ を作成する。(S34)再生像計算部20は、当該アドレスに格納されているデータ $LUT3[adr3]$ および $LUT3[adr4]$ をルックアップテーブル格納メモリ30より読み出す。(S35)そして、再生像計算部20は、再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を上記(21)式に従って計算する。

【0086】また、計算機ホログラムの画素 $(j, k)$ の位相レベル変化量 $\Delta p$ の値が限定されている場合に、再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を上記(24)式に従って計算するときには、上記(23)式で表されるルックアップテーブル $LUT4$ がルックアップテーブル格納メモリ30に格納される。この場合には、上記ステップS11、S12およびS16～S19それぞれにおける処理内容は上記と同様であるが、ステップS13～S15それぞれにおける処理内容は、以下のステップS43～S45のように置き換えられる。(S43)再生像計算部20は、これらのパラメータ $p$ 、 $p'$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $j$ および $k$ に基づいて、ルックアップテーブル格納メモリ30に格納されているデータを読み出す為のアドレス値 $adr5 (= Q(p' - p) + ap + bjm + ckn)$ を作成する。(S44)再生像計算部20は、当該アドレスに格納されているデータ $LUT4[adr5]$ をルックアップテーブル格納メモリ30より読み出す。(S45)そして、再生像計算部20は、再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を上記(24)式に従って計算する。

【0087】図3は、再生像の画素 $(m, n)$ の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を計算する際の計算量を纏めた図表である。ルックアップテーブル $LUT1$ および $LUT2$ を用いる上記(9)式と比較して、ルックアップテーブル $LUT3$ を用いる上記(14)式は、メモリ参照回数が同じであるものの、実数乗算回数および実数加減算回数それぞれが少ないので、計算時間が短い。また、位相レベル $p$ と $p'$ との和が所定の関係を満たす場合に用いられる上記(18)式および上記(21)式それぞれは、メモリ参照回数、実数乗算回数および実数加減算回数の何れも少ないので、計算時間が更に短い。さらに、計算機ホログラムの画素 $(j, k)$ の位相レベル変化量 $\Delta p$ の値が限定されている場合に用いられる上記(24)式は、メモリ参照回数、実数乗算回数および実数加減算回数の何れも更に少ないので、計算時間が更に短い。

【0088】

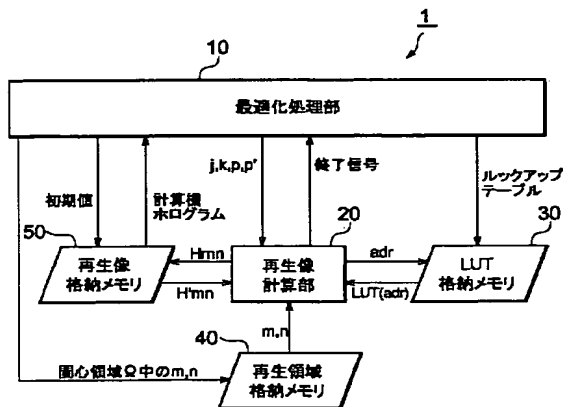
【発明の効果】以上、詳細に説明したとおり、本発明によれば、入力値 $q$ (ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $q$ および $Q$ それぞれは整数。)の入力に対して関数値 $\exp(2\pi i q$

／Q)が量子化された出力値LUT[q]を出力するルックアップテーブルを用いることにより、或いは、入力値 $sQ+q$ （ただし、 $0 \leq q < Q$ 、 $0 \leq s < P$ 、 $q$ 、 $Q$ 、 $s$ および $P$ それぞれは整数。）の入力に対して関数値 $[\exp(2\pi i s/P) - 1] \cdot \exp(2\pi i q/Q)$ が量子化された出力値LUT[sQ+q]を出力するルックアップテーブルを用いることにより、再生像を計算する際の演算量が削減され、計算機プログラムが短時間に作成される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本実施形態に係る計算機プログラム作成装置の\*

【図1】



\* 構成図である。

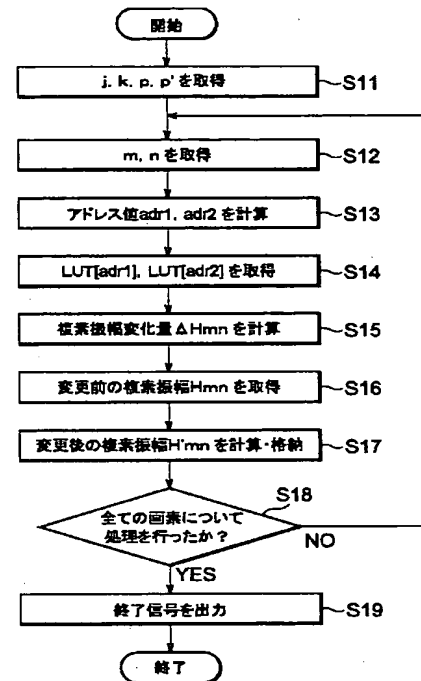
【図2】本実施形態に係る計算機プログラム作成装置および方法における再生像計算処理を説明するフローチャートである。

【図3】再生像の画素の複素振幅変化量 $\Delta H_m$ を計算する際の計算量を纏めた図表である。

【符号の説明】

1…計算機プログラム作成装置、10…最適化処理部、20…再生像計算部、30…ルックアップテーブル格納メモリ、40…再生領域格納メモリ、50…再生像格納メモリ。

【図2】



【図3】

計算式	使用するLUT	メモリ参照回数	実数乗算回数	実数加減算回数
(9)	LUT1, LUT2	5	4	4
(14)	LUT3	5	2	2
(18), (21)	LUT3	4	3	0
(24)	LUT4	3	2	0